

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta strojní**

**Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie**

**Návrh geometrie VBD pro frézování superslitin**

VBD Geometry Design for Super Alloy Milling

Student:

Jan Vomlel

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.

## Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Vomlel**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie  
Téma: **Návrh geometrie VBD pro frézování superslitin**  
**VBD Geometry Design for Super Alloy Milling**  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

1. Obecná charakteristika zadaného problému.
2. Problematika obrábění těžkoobrobitelných materiálů.
3. Návrh geometrie VBD pro superslitiny.
4. Diskuze experimentálních prací.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení.

### Seznam doporučené odborné literatury:

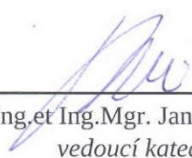
BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978-80-248-1641-8.  
NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.  
SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.  
STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. *Metal cutting theory and practice*. New York : Marcel Dekker, Inc., 1997. ISBN 0-8247-9579-2.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019

  
doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 20.5.2019



.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo)
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně k své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z jejich strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20.5.2019



.....

Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Jan Vomlel

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Šumperk, Krapkova 4, 787 01

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VOMLEL, J. *Návrh geometrie VBD pro frézování superslitin: Bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže, strojírenské metrologie, 2019, 49 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.

Bakalářská práce se zabývá optimalizací geometrie VBD pro frézování superslitiny Inconel 718 a porovnáním staré geometrie s geometrií nově navrženou. První teoretická část pojednává o zaměření firmy Dormer Pramet. V další části se zabývá rozdělením, obecnou charakteristikou a v neposlední řadě obrobitelností nejen niklových superslitin. Praktická část se zabývá analýzou stávající a nové geometrie VBD, kontrola a měření stávající a nové geometrie, ověření vlastností obou řešení geometrií praktickým testem na zkušebně obrábění Dormer Pramet.

Klíčová slova: HNGX09, Inconel, Dormer Pramet

## ANNOTATION OF BACHLEOR THESIS

VOMLEL, J. *Design of VBD Geometry For Milling of Superalloy: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB –Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly, Engineering Metrology, 2018, 49 p. Thesis head: doc. Ing. Vladimír Vrba, CSc.

Bachelor thesis deals with comparison of existing and newly designed geometry of exchangeable cutting edge for milling of superalloys. The first theoretical part focus on DormerPramet. Next part deals with division, general characteristics and the area of use of superalloys. The practical part deals with the analysis of the existing and new designed cutting edge geometry, control and measurement of existing and new geometry, verification of the properties of both geometry by a practical test at Dormer Pramet.

Key words: HNGX09, Inconel, Dormer Pramet

## Obsah

<b>Seznam použitých značek a symbolů:</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b>	<b>9</b>
<b>1 Obecná charakteristika zadaného problému</b>	<b>10</b>
1.1 Dormer Pramet	10
1.2 Charakteristika superslitin	11
1.2.1 Rozdělení superslitin	12
1.2.2 Superslitiny na bázi kobaltu	12
1.2.3 Superslitiny na bázi železa	13
1.2.4 Titan	13
1.2.5 Superslitiny na bázi niklu	15
<b>2 Obrábění materiálů skupiny ISO S</b>	<b>17</b>
2.1 Technologie obrábění	17
2.2 Obrobitelnost	17
2.3 Frézování Niklových superslitin	20
2.4 Řezné podmínky pro frézování niklových superslitin	20
2.5 Obrábění niklových slitin nástroji ze slinutých karbidů	20
2.6 Opatření řezného nástroje	21
2.7 Klasifikace typu opotřebení	22
<b>3 Experimentální část</b>	<b>28</b>
3.1 Popis a charakteristika experimentu	28
3.1.1 Inconel 718	28
3.2 Nástroje firmy Dormer Pramet	29
3.2.1 Fréza nástroj	29
3.2.2 HNGX 0906ANSN-M;M6330	30
3.2.3 Prototyp č. 1: HNGX 0906ANSN-SM-P01;M6330	31
3.2.4 Prototyp č. 2: HNGX 0906ANSN-SM-P02;M6330	31
<b>4 Praktické zkoušky obrábění</b>	<b>32</b>
4.1 Měření velikosti fazetek	33
4.2 Měření zaoblení řezných hran	33
4.2.1 Vyhodnocení měření	34
4.3 Funkční testy na utváření třísky + měření drsnosti	34
4.3.1 Vyhodnocení utváření třísek	35
4.3.2 Drsnost povrchu po průjezdu jednotlivých typů VBD	36
4.3.3 Vyhodnocení drsnosti	37
4.4 Trvanlivostní test	38

4.4.1	Vyhodnocení trvanlivostního testu .....	39
<b>5</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>Použitá literatura .....</b>	<b>47</b>
<b>7</b>	<b>Seznam příloh.....</b>	<b>49</b>

## Seznam použitých značek a symbolů:

Zkratka/symbol	Popis	Jednotka
$a_e$	Šířka frézované plochy	[mm]
$a_p$	Hloubka záběru	[mm]
$f$	Posuv	[mm . min <sup>-1</sup> ]
$f_z$	Posuv na zub	[mm]
HRSA	Žáruvzdorné materiály	
K	Řezivost	[%]
$l$	Délka záběru	[mm]
$Ra$	Střední aritmetická úchylka profilu	[μm]
$Rz$	Výška nerovnosti profilu určena z 10 bodů	[μm]
t	čas	[min]
T	Trvanlivost	[min]
VBD	Vyměnitelná břitová destička	
$VB_B$	Opotřebení hlavního břitu	[mm]
$VB_C$	Opotřebení špičky hlavního břitu	[mm]
$v_c$	Řezná rychlost	[m . min <sup>-1</sup> ]
$\kappa_r$	úhel nastavení	[°]



# ÚVOD

V dnešní době jsou superslitiny kvůli svým mechanickým vlastnostem, jako je vysoká tvrdost, vysoká odolnost proti korozi a mnohdy i nízká hmotnost používány stále častěji. Zásadou těchto vlastností, jež si zachovávají i v extrémním pracovním prostředí, jsou pak zvýšené nároky kladené i na rezný nástroj. Další vlastnost, která značně komplikuje obrábění těchto materiálů, je jejich nízká tepelná vodivost. Ta má za důsledek vysoké tepelné zatížení nástroje, nástroj pak musí vzdorovat nejen vysokému mechanickému namáhání, ale také zatížení tepelnému.

Veškeré tyto vlastnosti směřují k jejich snížené obrobiteľnosti. U některých dochází k nalepování či tvorbě nárůstku, jiné mají zvýšenou náchylnost ke zpevňování za studena, jež vede ke vzestupu namáhání a tím i zrychlenému opotřebení vyměnitelných břitových destiček. Z toho důvodu se při návrhu nástrojů pro obrábění materiálů skupiny ISO S směřuje velká pozornost hlavně na druh povlaku a geometrii rezné hrany nástroje.

V současnosti se VBD z velké části povlakuji a jsou opatřeny tvrdšími otěruvzdornými vrstvami. Povlak na rezných nástrojích je značným přínosem, a to jak z hlediska technického, tak ekonomického. Povlak ve valné míře zvyšuje životnost VBD, a tím přispívá k dobrému reznému výkonu.

Zabývat se studiem těžkoobrobitelných materiálů je důležité především proto, že se jejich užití stále rozšiřuje. Tyto materiály se používají v leteckém, lodním, i kosmickém průmyslu. Využití lze najít i v lékařství pro zhotovení tělních implantátů.

Firmou Dormer Pramet s.r.o. bylo umožněno podílet se na optimalizaci vyměnitelných břitových destiček typu HNGX pro operaci frézování materiálů skupiny ISO S. Test byl uskutečněn v experimentálním centru ve firmě Dormer Pramet, s.r.o., za účasti kvalifikovaných pracovníků. Testování VBD probíhalo na frézce MCM 1270 byla použita slitina Inconel 718. Tyto slitiny se vyznačují vysokou tvrdostí a při jejich obrábění dochází k rychlejšímu opotřebení a zkrácení životnosti VBD.

# **1 Obecná charakteristika zadaného problému**

Bakalářská práce se zabývá problematikou frézování těžkoobrobitelného materiálu, slitiny Inconel 718, tato slitina na bázi niklu a chromu vykazuje vysoké žáruvzdornosti a tvrdosti. Z toho vyplývá, že při obrábění této slitiny nástroj podléhá velkému mechanickému a tepelnému namáhání, to zřetelně snižuje jeho trvanlivost. Z toho důvodu se při návrhu nástrojů pro obrábění těchto materiálů směřuje velká pozornost hlavně na druh povlaku a geometrii řezné hrany nástroje.

Cílem práce je porovnání stávající a nově navržené geometrie VBD pro obrábění superslitin, analýza stávající a nové geometrie VBD, kontrola a měření stávající a nové geometrie, ověření vlastností obou řešení geometrií praktickým testem.

Bakalářská práce vznikla za spoluúčasti firmy Dormer Pramet s.r.o.

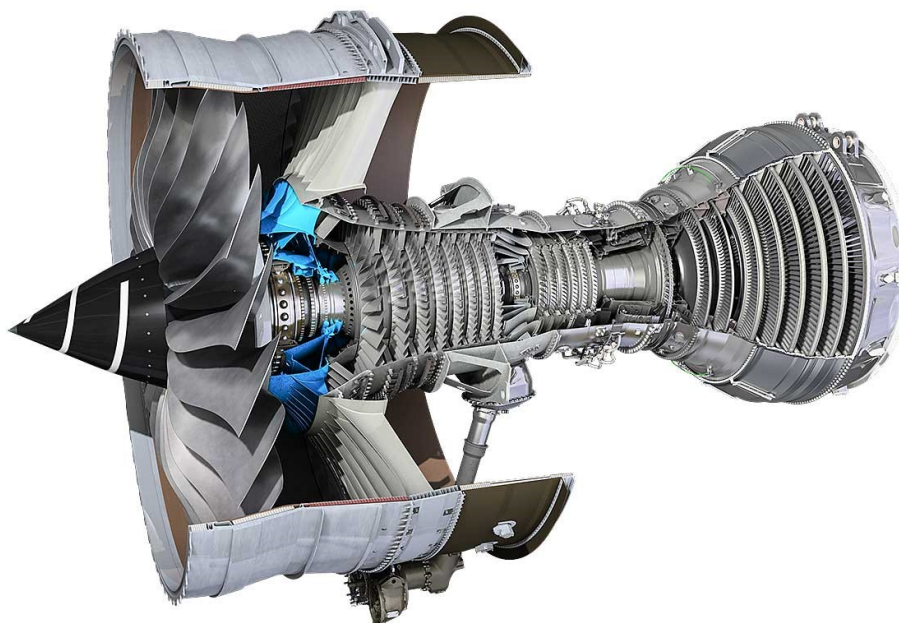
## **1.1 Dormer Pramet**

Společnost Dormer Pramet vznikla v roce 2014 spojením společnosti Pramet Tools a výrobcem monolitních nástrojů Dormer Tools. Samotný Pramet Tools má více než 60leté zkušenosti ve výrobě slinutého karbidu. Kromě výroby se zabývá také kompletním vývojem nástrojů a vyměnitelných břitových destiček. Sloučení těchto dvou společností významně doplnilo sortiment na trhu. V její nabídce se nachází jak monolitní nástroje, tak i nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami pro soustružení, frézování, závitování a vrtání. Firma dodává své výrobky téměř do všech evropských zemí a stále více jich směřuje do Jižní Ameriky a Asie. Kromě toho je jedním z předních dodavatelů v rámci české republiky.

## 1.2 Charakteristika superslitin

Superslitiny jsou tepelně odolné slitiny niklu, železa-niklu a kobaltu, které často pracují při teplotách nad 750° C. Vyžaduje se, aby vykazovaly kombinace vysoké pevnosti, dobré únavové a creepové odolnosti, dobré odolnosti proti korozi a schopnosti pracovat při zvýšených teplotách po delší dobu (tj. Metalurgická stabilita). Jejich kombinace zvýšené teplotní pevnosti a odolnosti proti degradaci povrchu není srovnatelná s jinými kovovými materiály. <sup>1,5</sup>

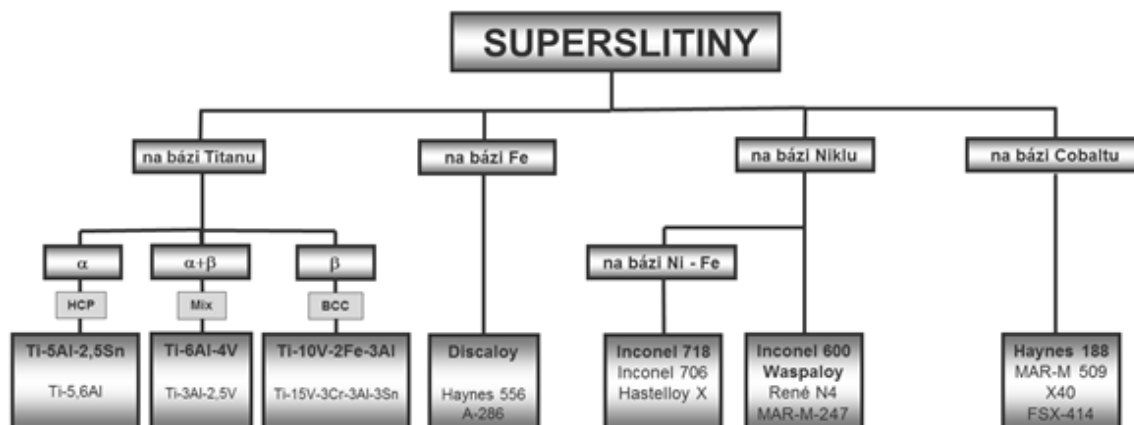
Výraz superslitina byl použit poprvé krátce po 2. světové válce k charakterizaci skupiny slitin vyvinutých pro použití v letadlových turbínových motorech, které vyžadovaly vysoký výkon za vysokých teplot. V roce 1940 byla ve Velké Británii patentována první superslitina s názvem NIMONIC. <sup>1,2</sup>



Obr. 1: Letecký motor <sup>9</sup>

## 1.2.1 Rozdělení superslitin

Superslitiny jsou klasifikovány do skupiny „S“, která je dále dělena dle převládajícího základního materiálu na slitiny titanu a žáruvzdorné materiály (HRSA) – slitiny na bázi niklu, železa a kobaltu.<sup>3</sup>



Obr. 2: Rozdělení superslitin na základě chemického složení<sup>3</sup>

## 1.2.2 Superslitiny na bázi kobaltu

Slitiny Kobaltu jsou velmi těžkoobrobitelné, kvůli vysoké tendenci k vytvrzování. Kobalt je převládající prvek této skupiny, obsahují avšak i podstatné množství legujících prvků Ni, Cr, W.

Na rozdíl od slitin Niklu, vynikají nejen vysokou odolností proti agresivnímu prostředí, ale vykazují i vysokou pevnost a tvrdost. Všechny zmíněné vlastnosti si zachovávají i při zvýšených teplotách. Z tohoto důvodu se slitiny kobaltu používají pro řezné nástroje pracující v agresivním prostředí, na ventily nebo jejich sedla. Speciální aplikací jsou biokompatibilní implantáty.<sup>4,7</sup>

Tab. 1: Zástupci superslitin na bázi kobaltu a podíl legujících prvků v % hmotnosti

Označení slitiny	Cr	Mo	W	Ni	Fe	C	Co
Stellit 6b	30	1,5	4,5	3	3	1,2	základ
Stellit 25	20		1,5	10	3	0,2	základ
MP 35 N	20	10		35			35
Vitallium	21	6		25			65

### 1.2.3 Superslitiny na bázi železa

Základní složkou je Fe, nicméně obsahují více Cr a Ni než obvyklé korozivzdorné oceli. Legujícím prvkem jsou Mo, W, Co, C. Zatím co obvyklé nerezavějící oceli obsahují okolo 12 % – 25 % Cr a 0 % – 20 % Ni. Superslitiny na bázi železa obsahují okolo 20 % Cr, ale více jak 20% Ni, (většinou % 25 – 35 %). Dalším zpevňujícím mechanismem je precipitační vytvrzení matrice, jehož je docíleno legováním Ti, Al nebo Nb. Ve srovnání se slitinami na bázi Co a Ni jsou lépe obrobitelné, příčinou je především pokles tvrdosti za vyšších teplot. Obrobitelnost slitin zpevněných za studena lze výrazně zvednout tepelným zpracováním (žiháním na měkko nebo žiháním na odstranění vnitřních pnutí).<sup>7</sup>

Tab. 2: Zástupce superslitin na bázi železa

Incoloy 800						
Prvek	Fe	Cr	Ni	C	Ti	Al
Obsah legur v %	45,7	21	32,5	0,05	0,38	0,38

### 1.2.4 Titan

K přednosti titanu a jeho slitin spadá hlavně jeho nízká měrná hmotnost ( $4\,505\text{kgm}^{-3}$  titan), vysoká měrná pevnost, stejná nebo i vyšší s měrnou pevností oceli a to i za teplot, kdy lehčí slitiny hliníku nebo hořčíku nemohou být použity (450 – 600 °C). Podstatná je i možnost konstrukčního použití za teplot pod bodem mrazu a vysoká odolnost proti korozi. Důvodem nedostatku titanu a jeho slitin jsou vysoké výdaje na jeho zpracování. Plynoucí z obtížného obrábění, velké reaktivity titanu s plyny a žáruvzdornými hmotami za teplot nad 700 °C, z nezbytně nákladného tavení a odlévání v ochranné atmosféře argonu nebo ve vakuu, z nesnadného tavného svařování provázeného hrubnutím zrna a neblahými fázovými přeměny při ochlazování spoje. Mínus je i nízký modul pružnosti v tahu ( $E = 115\text{ GPa}$ ), nepříznivé třecí vlastnosti a nemožnost přetvoření vratného odpadu cenného materiálu ve větším množství.<sup>8</sup>

Podle finální struktury, vzniklé při zdlouhavém ochlazování z teploty žihání se slitiny titanu dělí na: slitiny  $\alpha$ , slitiny pseudo  $\alpha$  (max 5% fáze  $\beta$ ), slitiny  $\alpha + \beta$ , slitiny pseudo  $\beta$  (malé množství fáze  $\alpha$ ) a slitiny  $\beta$ .

Tab. 3: Zástupci titanu a podíl legujících prvků v % hmotnosti

Označení slitiny	C	Fe	N2	Al	Sn	H2	Zr	Mo	V
Ti5Al2.5Sn	<0,08	<0,5	<0,05	4,0-6	2,0-3,0	<0,02			
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	<0,5	<0,25	<0,5	5,5-6,5	1,8 - 2,2		3,6-4,4	1,8-2,2	
Ti-10V-2Fe-3Al	<0,5	1,6-2,22	<0,5	2,6-3,4		<0,15 %			9-11
Ti-6Al-4V		<0,25		6					4

#### 1.2.4.1 Slitiny $\alpha$

Mimo  $\alpha$  stabilizátoru většinou obsahují neutrálně účinkující zirkon a cín. Mají vysokou tepelnou stabilitu, dobrou pevnost a odolnost proti křehkému porušení i za velmi nízkých teplot. Dobrou žárupevnost do 300 °C. Neoptimálnější vlastnosti mají slitiny s 5 % hmotnosti Al a 2 až 3 % hmotnosti Sn. <sup>8</sup>

#### 1.2.4.2 Slitiny pseudo $\alpha$

Do primární báze Ti-Al jsou dodány zpevňující a stabilizující prvky fáze  $\beta$ . Následného zpevnění se docílí neutrálně působícím Sn a Zr. Fáze  $\beta$  bývá obsažena 2 % až 6 %. Tyto slitiny vykazují o 10 % až 20 % větší pevnost než slitiny  $\alpha$  a v důsledku větší plasticity fáze  $\beta$  oproti fázi  $\alpha$  i lepší tvařitelnost za teploty okolo 20 °C. <sup>8</sup>

#### 1.2.4.3 Slitiny $\alpha + \beta$

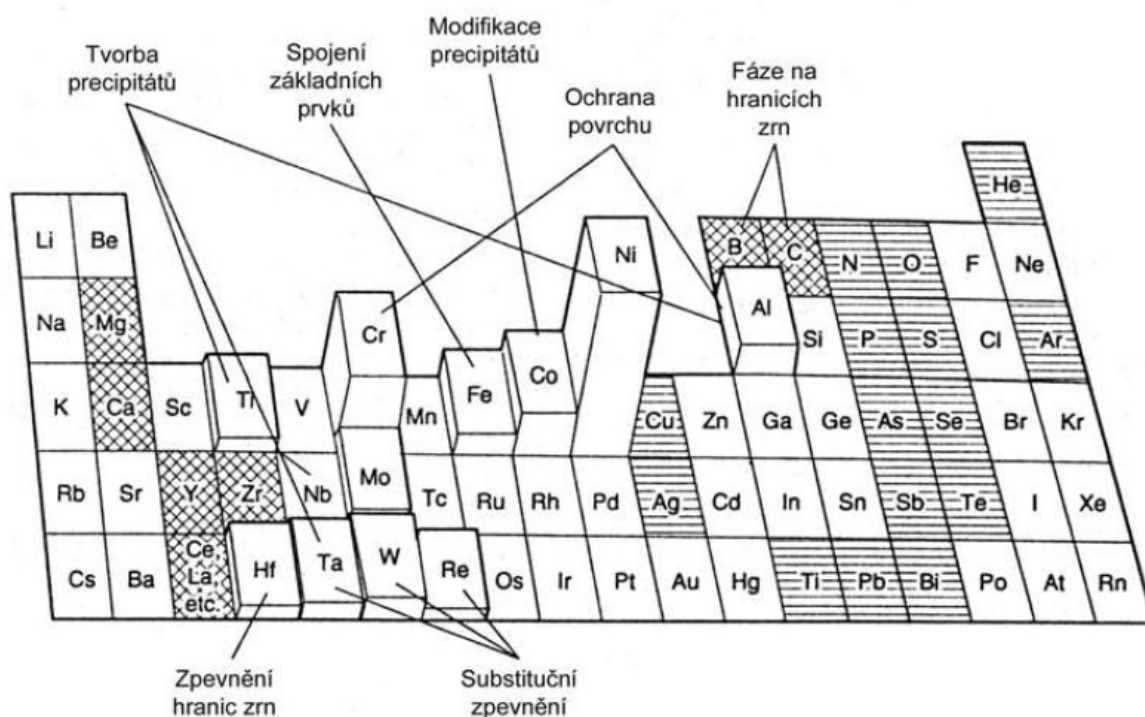
Charakterizují se velkou škálou struktur a vlastností závislých na podmínkách tváření a tepelného zpracování. Jsou to nejčastější slitiny (slitina Ti-6Al-4V s pevností v tahu až 1125 MPa je nejčastěji používaná slitina titanu). Proti slitinám  $\alpha$  a pseudo  $\alpha$  disponují lepší odolností proti únavovému namáhání, mají lepší tvařitelnost v žíhaném stavu a je možno je tepelným zpracováním vytvrdit (do maximálního průměru 25 mm). Svařitelnost a odolnost proti creepu je horší než u slitin  $\alpha$  a pseudo  $\alpha$ . Slitiny  $\alpha + \beta$  mají využití pro zatížené prvky jako lopatky kompresorů, turbín, částí podvozků letadel, jízdní kola, sportovní náradí aj. <sup>8</sup>

#### 1.2.4.4 Slitiny $\beta$ a pseudo $\beta$

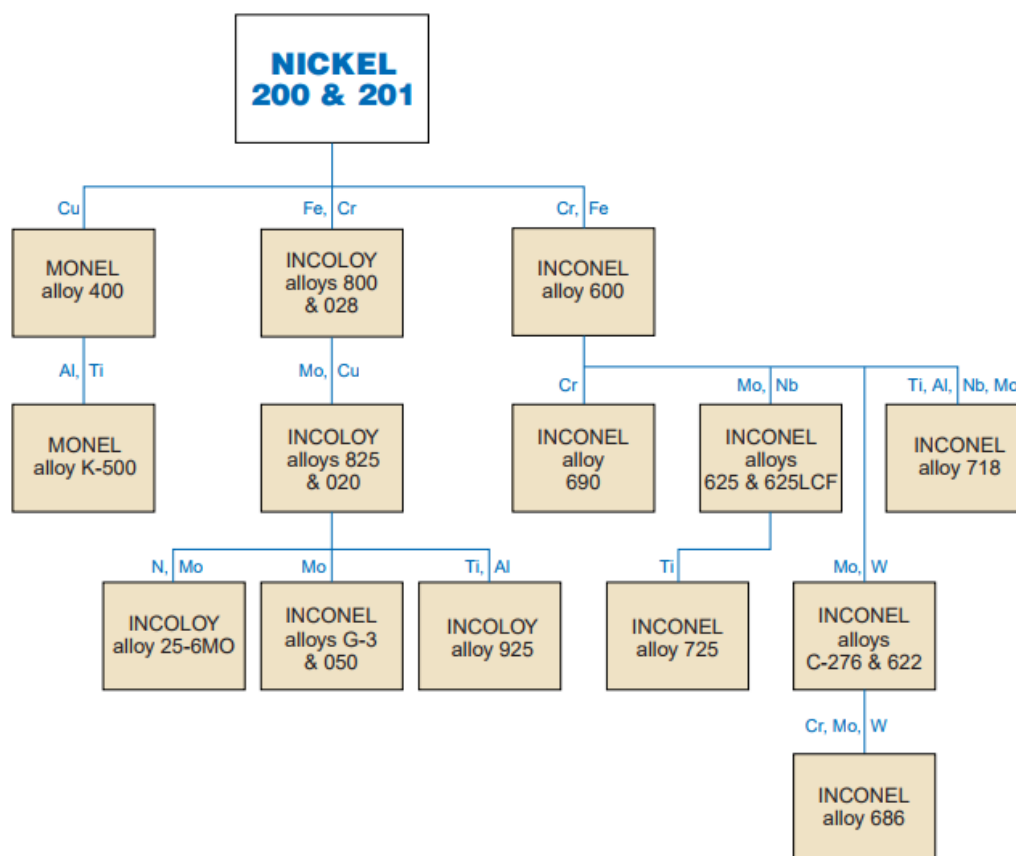
Jejich největší předností je velmi dobrá tvařitelnost za teploty okolo 20 °C a vysoká odolnost proti korozi. Pevnost v tahu těchto slitin činí po vytvrzení až 1400 MPa. Nedostatkem je vyšší hmotnost a cena než u jiných titanových slitin, důvodem je velká koncentrace přísadových prvků s velkou měrnou hmotností a vysokou teplotou tání, výroba těchto kovů v požadované čistotě je velmi obtížná a nákladná.<sup>8</sup>

#### 1.2.5 Superslitiny na bázi niklu

Korozivzdornost, žárupevnost a žáruvzdornost těchto slitin je dána chemickým složením. To udává například korozní odolnost, pevnost materiálu. Slitiny na bázi niklu jsou tvořeny převážně niklem (30 % - 70 %), ale obsahují i jiné legující prvky, nejvíce chrom, kobalt a hliník, dalšími složkami jsou wolfram, niob nebo molybden. Každá slitina niklu neobsahuje veškeré legující prvky a odlišuje se i jejich množstvím ve struktuře. Tyto superslitiny jsou velmi komplexní. Každý přísadový prvek ovlivňuje finální superslitinu jiným způsobem. Některé zvyšují odolnost proti oxidaci (Chrom a hliník), jiné přidávají na pevnosti (molybden, wolfram, niob, rhenium, tantal), zvýšení žáruvzdornosti se dosahuje přidáním titanu.<sup>14,7</sup>



Obr. 3: Vliv přísadových prvků na vlastnosti niklových slitin<sup>10</sup>



Obr. 4: Rozdělení niklových slitin dle chemického složení <sup>11</sup>

### 1.2.5.1 Inconely

Superslitiny na bázi niklu, chromu (16 % – 29%), železa (6 % – 19,5%), molybdenu (13 % – 16 %). Využití mají v oxidačních prostředích, pro zvýšení korozní odolnosti se přidává měď. Nachází uplatnění v jaderné energetice, u plynových turbín, turbodmychadel, chemických zařízení, tlumičů zbraní. Nejčastěji používaný typ je Inconel 600 (72% Ni, 14 % - 17% Cr). <sup>24</sup>

### 1.2.5.2 Monely

Superslitiny na bázi niklu a mědi (30 % – 32 %), železa (2 % – 3%). Monely vykazují dobré mechanické vlastnosti a výbornou chemickou odolnost v náročném prostředí, například při dlouhodobém styku se slanou vodou. Využití nachází v lodním průmyslu, ropných rafineriích. <sup>13</sup>

### 1.2.5.3 Incoloy

Superslitina na bázi niklu (30 % - 40 %), železa (20 % - 30 %), chromu (18 % - 20 %), a molybdenu (2 % - 5 %). Slitiny s vysokou odolností proti redukčním a oxidačním kyselinám. Využití nachází v mořících zařízeních, ochraně proti znečištění životního prostředí (zpracování vyhořelého jaderného paliva, těžba ropy, zemního plynu). <sup>15</sup>



## 2 Obrábění materiálů skupiny ISO S

### 2.1 Technologie obrábění

Obrábění je proces, u kterého dochází k úběru materiálu a tvoří se požadovaný tvar obrobku. Ostří je značnou silou vtlačeno do obráběného materiálu a způsobí oddělení v podobě třísky. Důsledkem je opracovaný povrch splňující požadované parametry. <sup>14</sup>

Superslitiny zařazujeme do skupiny těžkoobrobitelných materiálů. Ty se vyznačují specifickými mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi a jejich využití můžeme nalézt v kosmickém, leteckém či těžebním průmyslu. <sup>16</sup>

Obrábění těchto materiálu přináší mnoho problémů a je pro všechny dílčí operace obrábění specifické, jak ze strany požadavků na obráběcí stroj a řezný nástroj, tak i volbou řezných podmínek. <sup>16</sup>

### 2.2 Obrobitelnost

Je možno definovat jako míru schopnosti daného materiálu být zpracováván technologií obrábění. Obrobitelnost patří k nejdůležitějším vlastnostem materiálu a je zásadním parametrem pro volbu řezných podmínek. <sup>14,16</sup>

Samotná obrobitelnost je závislá na několika faktorech, z nichž hlavní jsou chemické složení, fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného materiálu, výroba a tepelné zpracování obráběného materiálu, mikrostruktura, metoda obrábění, strategie řezného procesu (způsob chlazení, upnutí nástroje a obrobku), geometrie a materiál řezného nástroje. <sup>14,16</sup>

Podle charakteristiky se obrobitelnost rozděluje na absolutní a relativní. **Absolutní obrobitelnost** vyžaduje určit vzorce potřebné k výpočtu trvanlivosti nástroje, řezných sil a drsnosti povrchu od parametru řezání. **Relativní obrobitelnost** je určena bezrozměrnými čísly, jenž nám udávají poměr velikosti veličiny vztahující se ke zkoumanému materiálu a velikosti referenčního materiálu. <sup>14,16</sup>

Niklové superslitiny se rozdělují do 5 skupin obrobitelnosti. Každá se charakterizují specifickou základní strukturou, chemickým složením a způsobem zpracování. Skupiny I. až IV. se od sebe moc neliší. Jejich struktura má kladný vliv na opotřebení nástroje, kvalitu

povrchu a tvorbu třísky. Skupina V. jsou těžkoobrobitelné slitiny, mají hrubozrnnou strukturu a nízkou pevnost na hranicích zrn. <sup>17</sup>

Na obrobitelnost má vliv pět základních vlastností materiálu: tendence k deformačnímu zpevnění, tepelná vodivost, tažnost (přilnavost), tvrdost, abrazivost. <sup>16</sup>

### **Tažnost**

Niklové superslitiny zpravidla mají větší tažnost a přilnavost než běžně používané oceli. Z toho vyplývá, že řezné materiály pro tyto slitiny musí být houževnatější a mít co nejnižší tendenci k adhezi, to nám zajistí povlak. Mikrogeometrie ostří musí vykompenzovat vyšší tažnost a příznivě utvářet třísku. Snížení náklonosti k adhezi můžeme docílit zvýšením řezné rychlosti. Zvýšenou pozornost je potřeba soustředit na vylamování řezné hrany (důvodem je tvorba nárustků), odlupování povlaku a vrubovému opotřebení. <sup>16</sup>

### **Deformační zpevnění**

Niklové superslitiny vykazují vyšší sklony k deformačnímu zpevnění. Toto musí vyloučit správná mikrogeometrie ostří (ostré hrany omezují deformační zpevnění při řezném procesu). Hloubku záběru je nezbytné neustále měnit (rozloží se tak riziko vzniku zřetelného vrubového opotřebení na ostří při obrábění deformačně zpevněné vrstvy) a volit co nejvyšší možnou posuvovou rychlost. Prostým následkem této vlastnosti je vyšší vrubové opotřebení a drobné vylamování řezné hrany. <sup>16</sup>

### **Tvrdost**

Niklové slitiny vykazují obdobnou tvrdost jako oceli. Není tedy nutné jakéhokoliv specifického opatření co se týče velikosti řezných sil. V porovnání s běžnými oceli není nutno omezovat posuvy, ani hloubku řezu. Zvolíme-li správné nastavení všech ostatních parametrů, tak by se převládající opotřebení mělo projevovat jako otěr na hřbetu. <sup>16</sup>

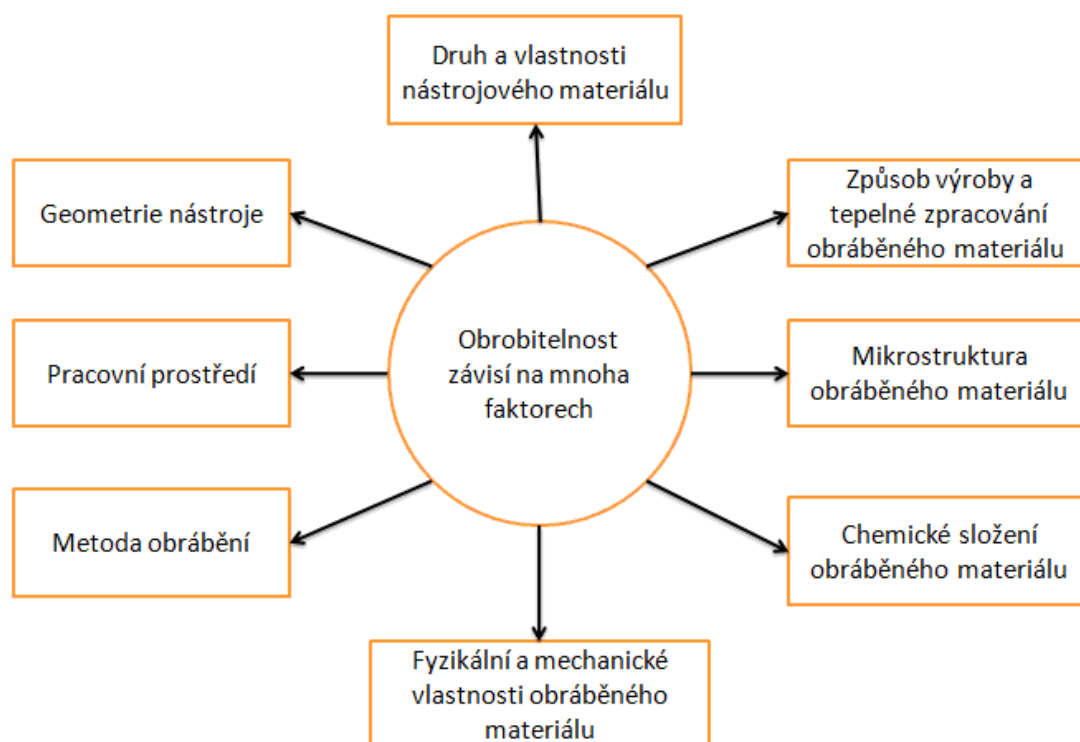
### **Tepelná vodivost**

Niklové superslitiny vykazují nižší tepelnou vodivost (4 až 6 krát menší, a to 10 až 15  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), to se projevuje menším odvodem tepla třískou a vyšším přenášením tepla do řezné hrany. Důležitou vlastností u řezného materiálu je tedy vysoká tvrdost za vysokých teplot. Řezné rychlosti a posuvy je potřeba volit svědomitě tak, aby byl vznik tepla omezen a co nejvíce tepla bylo odvedeno třískou. Charakteristickým opotřebením nástroje je plastická deformace. <sup>16</sup>

## Abrazivnost

Superslitiny niklu mají vyšší abrazivnost, to přikládá zvýšené požadavky na povlak. Tyto povlaky proto musí být velmi otěruvzdorné. Abrazivnost podněcuje prudký vznik výmolů, proto je podstatné maximalizovat využití nástroje.<sup>16</sup>

Zhodnotíme-li výše uvedené vlastnosti a jejich důsledný vliv na řezný proces, můžeme obrobiteľnost niklových superslitin definovat jako rozdílnou od obrobiteľnost běžných ocelí. Proto musíme volit rozdílný postoj při volbě řezných parametrů a nástroje.<sup>16</sup>



Obr. 5: Obrobiteľnost<sup>22</sup>

## 2.3 Frézování Niklových superslitin

Obrobitelnost niklových slitin žádá rozdílný postoj než při obrábění běžných ocelí. Pro větší spolehlivost a co nejvyšší trvanlivost rezného nástroje je nezbytné zajistit co největší tuhost nástroje, ideální geometrii s co nejlepší řezivostí a to i za vyšších rezných parametrů, patřičnou jakost SK a povlaku pro co nejdelší životnost, neposlední řadě poskytnout postačující přívod procesního média skrze nástroj přímo na břit.<sup>18</sup>

## 2.4 Řezné podmínky pro frézování niklových superslitin

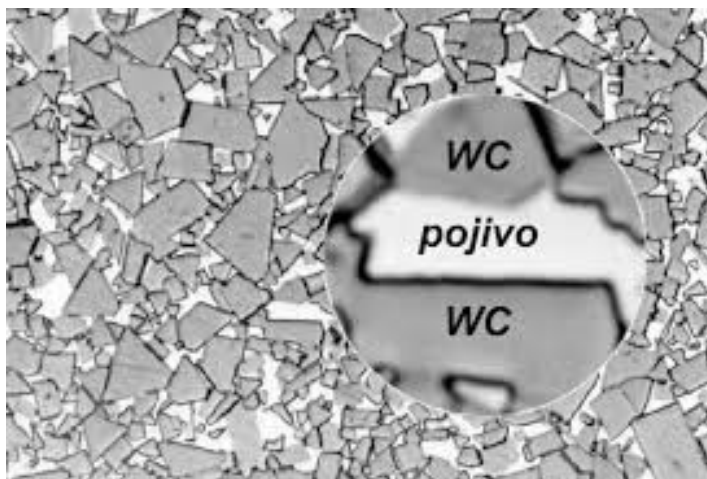
Volba rezného nástroje je ovlivněna především druhem namáhání na něj působící. Základní požadavky na nástroj jsou: vysoká tvrdost, houževnatost, značná pevnost, odolnost proti opotřebení, odolnost proti teplotním šokům, chemická stabilita za zvýšených teplot. Speciální nároky jsou kladeny i na reznou geometrii nástroje, ta musí za existujících rezných podmínek splňovat co nejvyšší trvanlivost, dobrou pevnost, obrábění bez vibrací a chvění.

Zdokonalení rezných podmínek a odolnosti proti opotřebení můžeme u nástrojů ze SK zvýšit povlakováním PVD, jedná se o nanesení zhruba 2 μm tenkých vrstev vynikajících fyzikálními i chemickými vlastnostmi (TiN + TiCN + TiN). Řezné podmínky při obrábění niklových superslitin musí vyhovět požadavkům pro zabezpečení snadného a účinného obrábění materiálu. Zpravidla se přikládá důraz hlavně na rezné rychlosti a posuv, to má vliv na množství odebraného materiálu za čas. Bez ohledu na rezný průběh je pro obrábění niklových slitin doporučeno použití menšího úběru a nízkých rezných podmínek. Toto doporučení je dáno hlavně hromaděním vysokých teplot v místě řezu, těm nejsou všední nástroje schopny dlouze vzdorovat a prudce ubývají na svých rezných vlastnostech.<sup>19</sup>

## 2.5 Obrábění niklových slitin nástroji ze slinutých karbidů

Nástroje ze slinutého karbidu jsou nejstaršími a současně nejrozšířenějšími materiály řadící se do tvrdých rezných nástrojů. Při obrábění Ni slitin se používají rychlosti 10 – 30 m.min<sup>-1</sup>. Wolframové karbidy mají využití při vysokých posuvových rychlostech a při přerušovaném řezání, avšak vzhledem k jejich termochemické nestabilitě nemůžou být použity při vyšších rezných rychlostech. Často je pro obrábění niklových slitin používáno SK s větším zastoupením kobaltu nebo jemnozrnější strukturou. Při povlakování metodou PVD je možno použít rezných rychlostí až 50 m.min<sup>-1</sup>. Při obrábění Ni slitin nástroj podléhá velkému mechanickému a tepelnému namáhání, to zřetelně snižuje jeho trvanlivost. Nejčastějšímu opotřebení při obrábění Ni slitin je vytváření vrubu na hřbetě a čele nástroje.

Kromě chemického složení SK a povlaku má vliv na jejich trvanlivost i řezná geometrie těchto nástrojů. Nejčastěji se pro obrábění Ni slitin volí ostrá řezná geometrie s poloměrem špičky 0,4 mm pro dokončovací operace a 0,8 – 1,2 mm pro hrubovací operace. Nicméně řezné vlastnosti těchto destiček jsou omezeny rychlostí posuvu, dosaženou drsností povrchu, zejména pak nižší odolností proti opotřebení.<sup>19,20</sup>



Obr. 6: Struktura WC-Co po slinování<sup>21</sup>

## 2.6 Opotřebení řezného nástroje

Při obrábění vzniká značné kvantum tepla, to se vyvíjí na čele a hřbetu nástroje. Tepelné namáhání velmi zatěžuje materiál břitu a například při frézování tvoří dynamický faktor ve chvíli, kdy jeden břit z materiálu vybíhá a následně do něj znovu vniká. Při procesu tvoření třísky se kontinuálně za značné teploty a velkého tlaku tvoří čistý kovový povrch s náchylností k difuzním procesům a chemickým reakcím. Velká část obráběných materiálů má podíl tvrdých částic rozmanitého typu. Tyto částice často dosahují tvrdosti materiálu břitu nástroje. Dojde tak k abrazivnímu nebo brousícímu účinku.<sup>23</sup>

Spojení uváděných tepelných, chemických, abrazivních a mechanických činitelů se projevuje jako komplikované zatížení břitu nástroje. To se následně jeví jako opotřebení nástroje. Mezi základní mechanizmy opotřebení se řadí zejména<sup>23</sup>:

**Abraze** – brusný otěr dopadem tvrdých mikročástic obráběného materiálu i mikročástic uvolněných z nástroje)

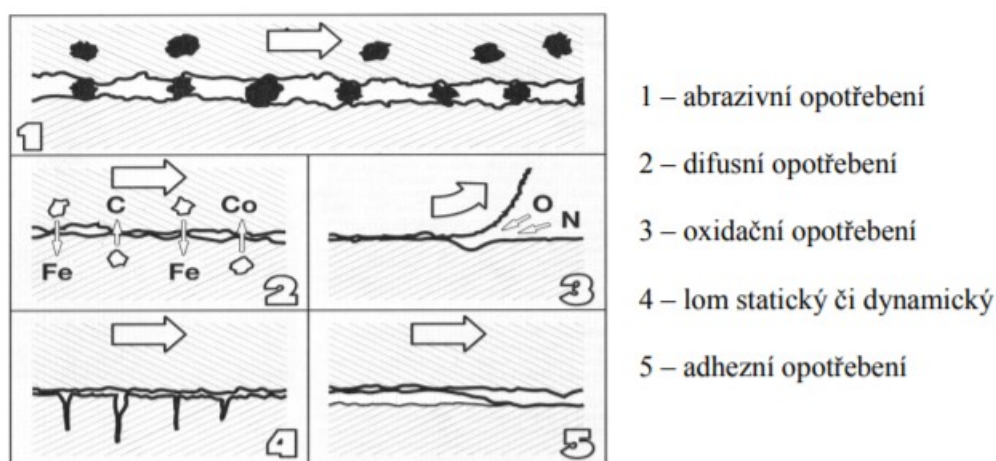
**Adheze** – tvoření a následné bezprostřední porušení mikrosvarových spojů na dotýkajících se vrcholcích nerovností čela a třísky následkem velkých teplot a tlaků, chemické podobnosti materiálů a kovově čistých styčných povrchů

**Difúze** – přecházení atomů z obráběného materiálu do nástrojového a zase zpátky, následkem je tvoření nežádaných chemických sloučenin ve struktuře nástroje.

**Oxidace** – tvoření chemických sloučenin na zevnějšíku nástroje následkem výskytu kyslíku v obklopujícím ovzduší.

**Plastická deformace** – následek nahromadění velkého tepelného a mechanického zatížení

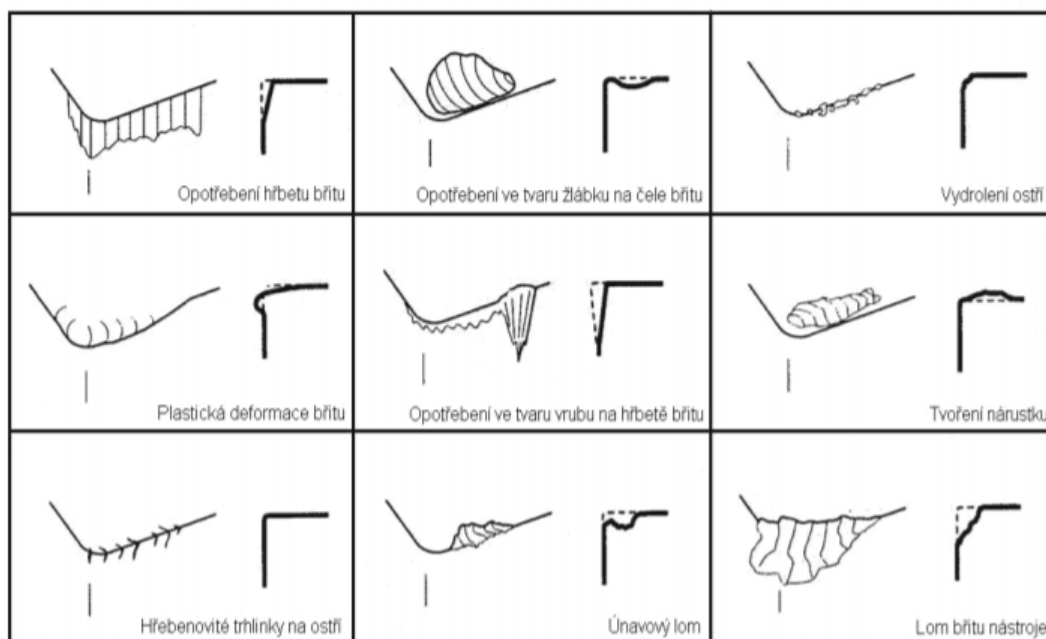
**Křehký lom** – následek velkého mechanického zatížení, například přerušovaný řez, vměstky v obráběném materiálu, nehomogenita.



Obr. 7: Hlavní mechanismy opotřebení břitu nástroje <sup>23</sup>

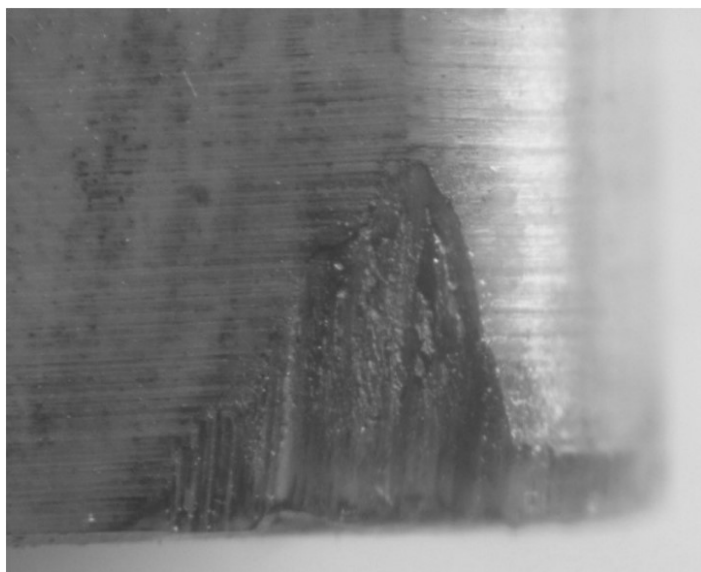
## 2.7 Klasifikace typu opotřebení

Pohled na zvětšený břit a posouzení opotřebení na něm patrná je dobrým nástrojem pro kontrolu trvanlivosti, její spolehlivosti a eventuálně i možností jejího prodloužení. V obrázku č. 8 je uváděna klasifikace dílčích druhů opotřebení. <sup>23</sup>



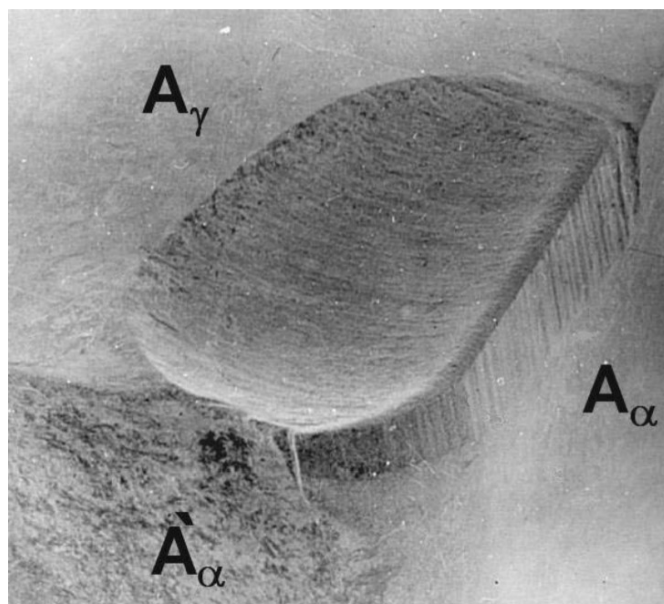
Obr. 8: Rozdělení dílčích typů opotřebení <sup>23</sup>

**Opotřebení hřbetu bříty** – Spadá do abrazivní podoby opotřebení a ukazuje se na hřbetní ploše bříty. Při utváření a po utváření třísky plochy hřbetu u hlavního ostří, vedlejšího ostří a poloměru špičky podléhají působení materiálu obrobku. Opotřebení hřbetu je povšechně běžným druhem opotřebení. Rovnoměrně rostoucí opotřebení hřbetu je mnohdy pokládáno za vzorné. Avšak důsledkem většího opotřebení hřbetu je horší jakost povrchu obráběné plochy, nepřesné rozměry a narůstání tření vznikající změnou geometrie bříty. <sup>23</sup>



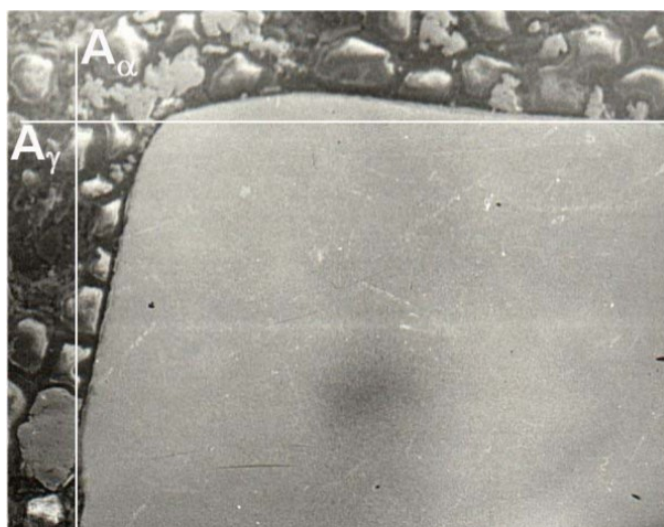
Obr. 9: Opotřebení hřbetu bříty <sup>23</sup>

**Opotřebení ve tvaru žlabu na čele** – je následkem difuze a abraze. Žlab vzniká difuzí v místě břitu s největším teplotou (v místě kontaktu materiálu břitu a třísky) a vlivem působení tvrdých částic materiálu, brousícím efektem dochází k úběru rezného materiálu nástroje. Zmírnění tohoto opotřebení můžeme docílit vyšší tvrdosti za tepla a menší afinitou mezi materiály břitu nástroje a obrobku.<sup>23</sup>



Obr. 10: Opotřebení ve tvaru žlabu<sup>23</sup>

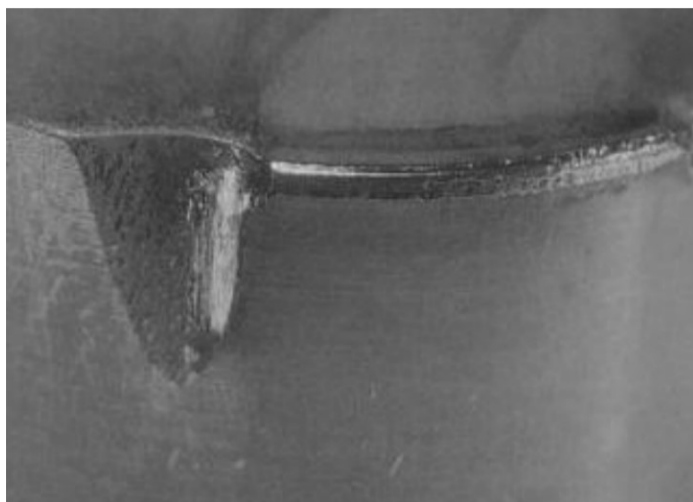
**Plastická deformace břitu** – je důsledkem působení souhry vysokých teplot a řezných tlaků na břit nástroje. Tvrdost za tepla rezného materiálu nástroje je kritickým faktorem. Plastickou deformaci břitu je možno omezit užitím rezného materiálu s větší otěruvzdorností, správnou geometrií nástroje a volbou správného zaoblení ostří.<sup>23</sup>



Obr. 11: Plastická deformace břitu (vyboulení)<sup>23</sup>



**Opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě bříty** – Je charakteristickým adhezním opotřebením. Avšak může korelovat s jevem oxidačního opotřebení. Opotřebení ve tvaru vrubu se vytváří v působišti kontaktu bříty s bokem třísky. Tento druh opotřebení se vymezuje striktně na místo, kde prostupuje vzduch do pole působnosti obrábění. Výjimečně vydatné opotřebení ve tvaru vrubu má vliv na tvorbu třísky a může dojít až k lomu destičky.<sup>23</sup>



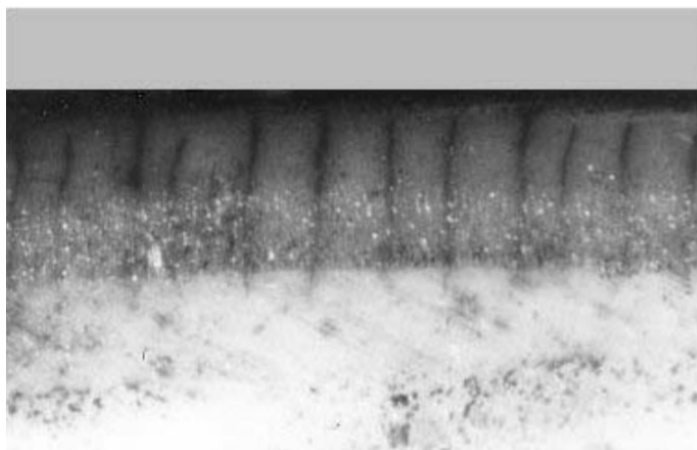
*Obr. 12: Opotřebení ve tvaru vrubu <sup>23</sup>*

**Tvoření nárůstků** – Nižší teploty a vysoké tlaky způsobí mezi čelem nástroje a materiálem obrobku účinek svařování. Afinita bříty k materiálu je hlavním faktorem tohoto typu opotřebení. Většina novodobých způsobů obrábění se uskutečňuje nad oblastí tvoření nárůstků a velká část novodobých řezných materiálů nejsou náchylné k tomuto typu opotřebení.<sup>23</sup>



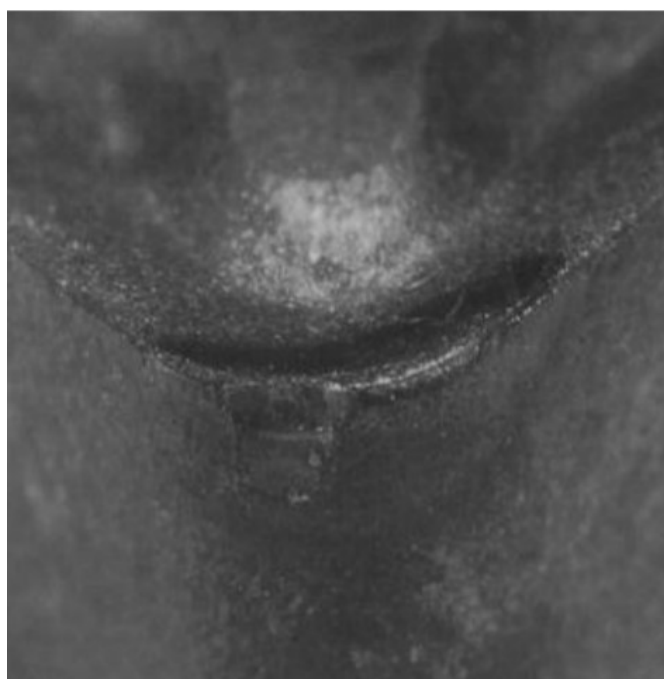
*Obr. 13: Tvorba nárůstků na hřbetě <sup>23</sup>*

**Vznik hřebenových trhlinek** – Vznik tohoto typu opotřebení je dán tepelným šokem. Změna teplot při frézování je mnohokrát důvodem vzniku tohoto opotřebení. Trhlinky se vytváří kolmo na ostří. Segmenty mezi dílčími trhlinkami se můžou vylamovat a způsobit náhlý lom břitu. <sup>23</sup>



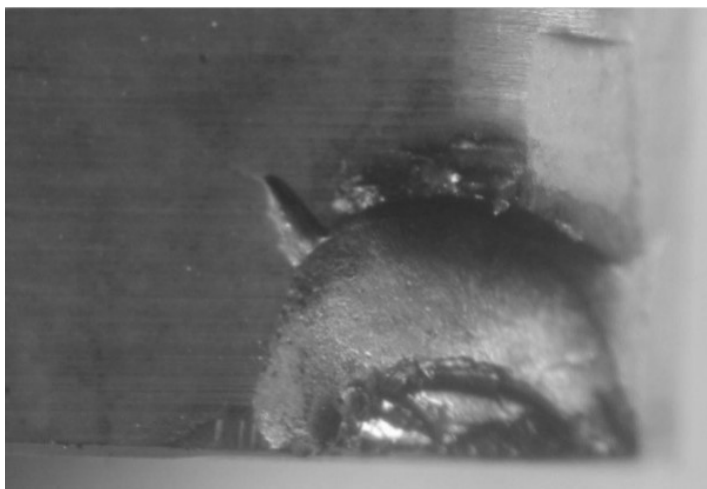
*Obr. 14: Vznik hřebenovitých trhlinek <sup>23</sup>*

**Únavový lom** – Je důsledkem neobvykle velkých změn velikosti řezných sil. Tento typ lomu je způsoben neustále se měnících různorodých zatížení, kdy jednotlivá zatížení nejsou natolik velká, aby měla za následek lom. <sup>23</sup>



*Obr. 15: Únavový lom <sup>23</sup>*

**Lom břitu nástroje** – Křehký lom může být zapříčiněn mnoha faktory. Mnohdy je materiál břitu příliš málo houževnatý na to, aby odolal všem požadavkům na obrábění. <sup>23</sup>



*Obr. 16: Lom břitu nástroje <sup>23</sup>*

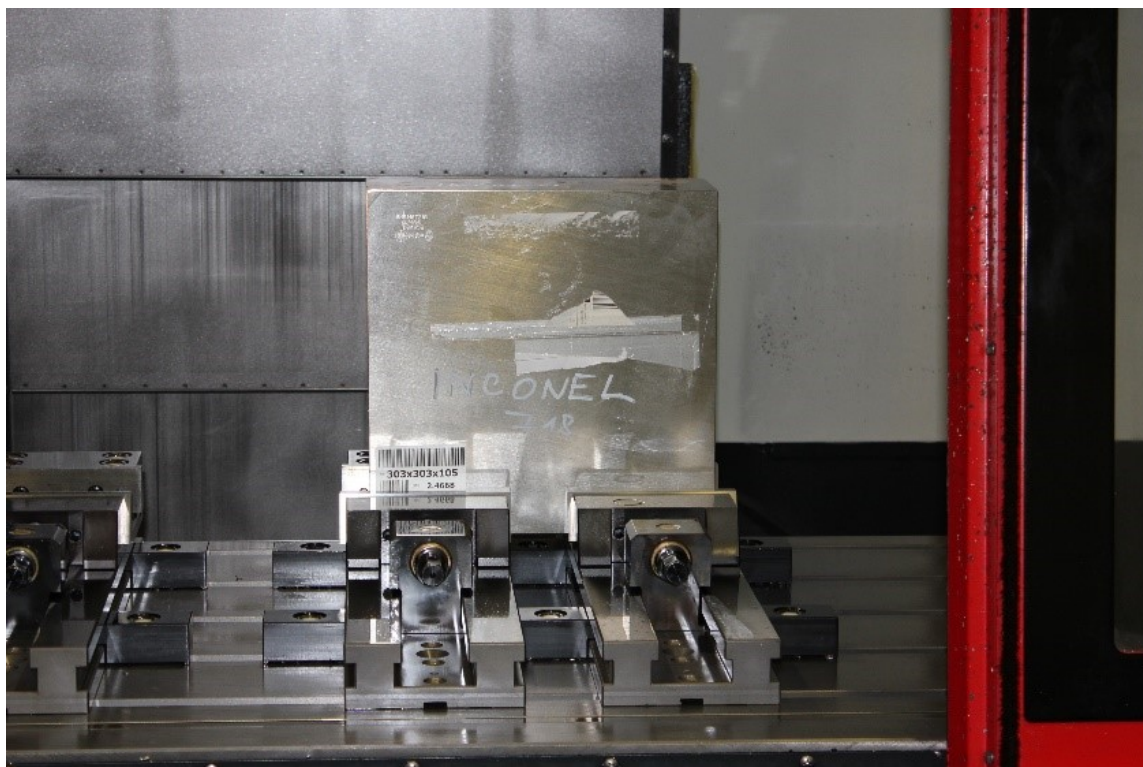
## 3 Experimentální část

### 3.1 Popis a charakteristika experimentu

Firmou Dormer Pramet s.r.o. bylo umožněno podílet se na optimalizaci vyměnitelných břitových destiček typu HNGX 09 pro operaci frézování materiálů skupiny ISO S. Testy byly uskutečněny v experimentálním centru firmy: Dormer Pramet s.r.o. za účasti kvalifikovaných pracovníků. Testování VBD probíhalo na frézce MCM 1270, byla použita slitina Inconel 718. Tato slitina se vyznačuje vysokou tvrdostí a při jejím obrábění dochází k rychlejšímu opotřebení a zkrácení životnosti VBD.

#### 3.1.1 Inconel 718

Slitina na bázi niklu a chromu, která obsahuje velké množství železa, niobu a molybdenu a menší množství hliníku a titanu. Tato slitina vykazuje vysokou korozní odolnost a vysokou mez pevnosti při tečení do 700°C, s mimořádnou svařitelností včetně odolnosti proti popraskání. Její uplatnění můžeme najít ve spalovacích turbínách, leteckém průmyslu nebo raketových motorech.



*Obr. 17: Slitina inconel 718 upnutá v čelistech*

## 3.2 Nástroje firmy Dormer Pramet

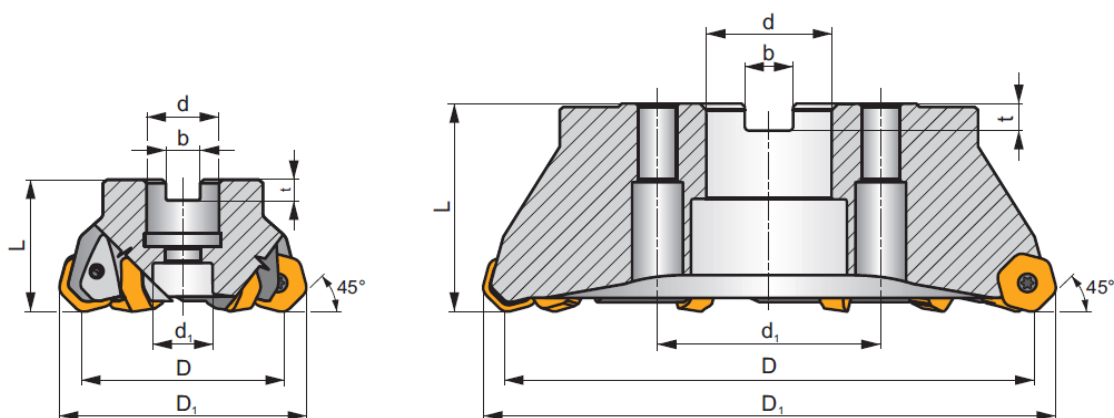
Pro experiment byl vybrán nástroj řady SHN09C.






### 3.2.1 Fréza nástroj

Pro obrábění na zkušebně firmy Dormer Pramet byla použita rovinná fréza s označením: **63A06R-S45HN09C-CF** (obr. 19) tato fréza má nerovnoměrnou zubovou rozteč, které přispívá ke zvýšení stability a ke snížení rizika vzniku vibrací

Technické parametry:

- Pravotočivá
- S otvory pro chlazení
- Upínání VBD pomocí šroubku
- Maximální hloubka záběru  $a_p = 5\text{mm}$



ISO	D	D <sub>1</sub>	L	d	d <sub>1</sub>	b	t	$\gamma_f^\circ$	$\gamma_p^\circ$					
63A06R-S45HN09C-CF	63	74,7	40	22	18	10,4	6,3	-7	-7	6	✓	7000	✓	0,54

Obr. 18: Rozměry frézy



Obr. 19: Fréza 63A06R-S45HN09C

### 3.2.2 HNGX 0906ANSN-M;M6330

Jedná se o oboustranné destičky ve tvaru pravidelného šestihranu s 12 řeznými hranami o velikosti 15,875 mm a tloušťce destičky 6,35 mm, destičky jsou konstruovány s nulovým úhlem hřbetu, úhel nastavení  $\kappa_r$  je  $45^\circ$ , řezná hrana je provedena se zaoblením a fazetkou. Geometrie na těchto destičkách je typu M – vhodná pro střední obrábění, pomáhá dosahovat malých řezných sil.

Tyto destičky jsou vyrobeny z materiálů s označením „M6330“, který byl vyvinut pro zvýšení trvanlivosti a provozní spolehlivosti při frézování korozivzdorných ocelí a těžkoobrobitelných materiálů. Je uzpůsobený pro nepříznivé řezné podmínky včetně přerušovaného řezu.



Obr. 20: VBD typu HNGX 0906ANSN-M;M6330

### 3.2.3 Prototyp č. 1: HNGX 0906ANSN-SM-P01;M6330

Oba prototypy vychází z VBD typu M. Jedná se tedy o obdobnou destičku lišící se větším vytažením čela, které by mělo přispívat k lehčímu zařiznutí do materiálu, geometrie s označením SM je modifikací geometrie typu M, je vhodná pro přerušovaný řez a obrábění korozivzdorných ocelí. Stejně jako u destiček geometrie M jsou vyrobeny z materiálu M6330.



*Obr. 21: VBD typu HNGX 0906ANSN-SM-P01;M6330*

### 3.2.4 Prototyp č. 2: HNGX 0906ANSN-SM-P02;M6330

Opět se jedná o destičku vycházející z geometrie M, obdobně jako prototyp č. 1 má více vytažené čelo, k tomu menší šířku fazetky na špičce řezné hrany.



*Obr. 22: VBD typu HNGX 0906ANSN-SM-P02;M6330.*



## 4 Praktické zkoušky obrábění

Praktické zkoušky jednotlivých VBD byly složeny ze dvou částí: funkční testy na utváření třísek v místě řezu + měření drsnosti a trvanlivostní testy.

Všechny testy byly uskutečněny na zkušebně ve firmě Dormer Pramet za doprovodu kvalifikovaných pracovníků. Testy probíhaly na frézovacím centru od firmy Kovosvit MAS s označením MCV 1270 (obr. 23). Technické parametry jsou uvedeny v tabulce 4.



Obr. 23: Frézovací centrum MCV 1270

Tab. 4: Technické parametry frézovacího centra MCV 1270 <sup>6</sup>

Upínací plocha stolu	1500 x 670 mm
Maximální zatížení stolu	1200 kg
Pracovní rozsah X,Y,Z	1270 - 610 - 720 mm
Maximální otáčky	8000 min <sup>-1</sup>
Pracovní posuv X,Y,Z	1 - 40000 mm*min <sup>-1</sup>
Rychloposuv X,Y,Z	40 m*min <sup>-1</sup>
Rozměry	5000 x 3600 x 3300 mm
Hmotnost	11 800 kg

Před samotnými testy bylo na všech testovaných VBD změřeno zaoblení řezné hrany a šířka fazetky z důvodu možných odchylek při výrobě. K testům poté byly vybrány ty VBD s nejvíce odpovídajícími rozměry.



#### 4.1 Měření velikosti fazetek

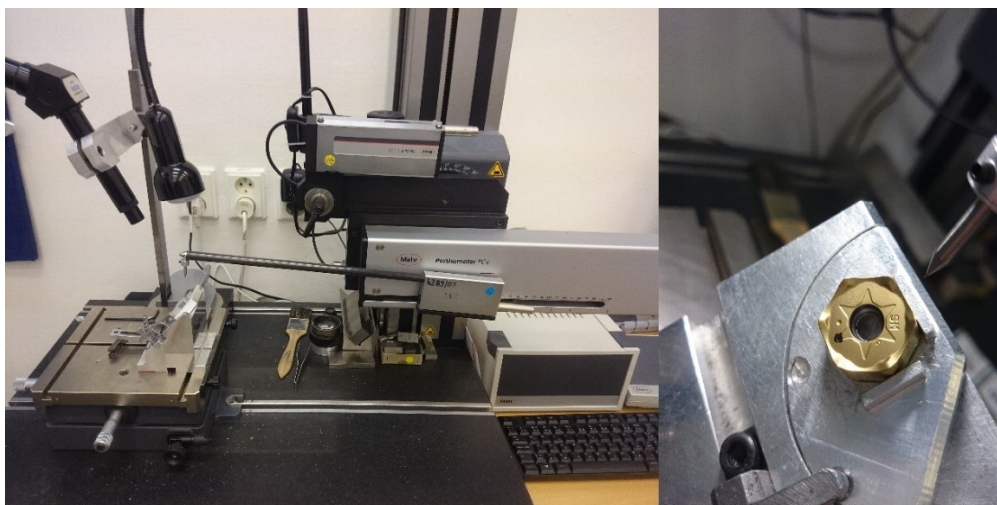
Přeměření fazetek bylo prováděno pomocí dílenského mikroskopu značky Carl-Zeiss Jena s mikrometrickým šroubem, doplněného o digitalizované měrky Essa (obr. 24). Výsledky měření jsou uvedeny v příloze A.



*Obr. 24: Mikroskop Carl Zeiss Jena a digitalizované měrky Essa*

#### 4.2 Měření zaoblení řezných hran

Přeměření zaoblení řezných hran bylo prováděno pomocí Perthometru PCV značky Mahr. Jde o multifunkční přístroj, který dokáže změřit zaoblení řezné hrany. Výsledky měření jsou uvedeny v příloze A.



*Obr. 25: Perthometer PCV značky Mahr a detail upnutí VBD*

### 4.2.1 Vyhodnocení měření

Z naměřených hodnot byly pro trvanlivostní test vybrány následující vzorky viz tabulka 5.

Tab. 5: Vybrané vzorky

Typ	Vzorek	Zaoblení řezné hrany [ $\mu\text{m}$ ]	Šířka fazetky [mm]
HNGX 0906ANSN-M;M6330	A11	35	0,104
	A20	35	0,103
HNGX 0906ANSN-SM-P01;M6330	B14	35	0,107
	B16	35	0,107
HNGX 0906ANSN-SM-P02;M6330	C14	35	0,108
	C16	35	0,104

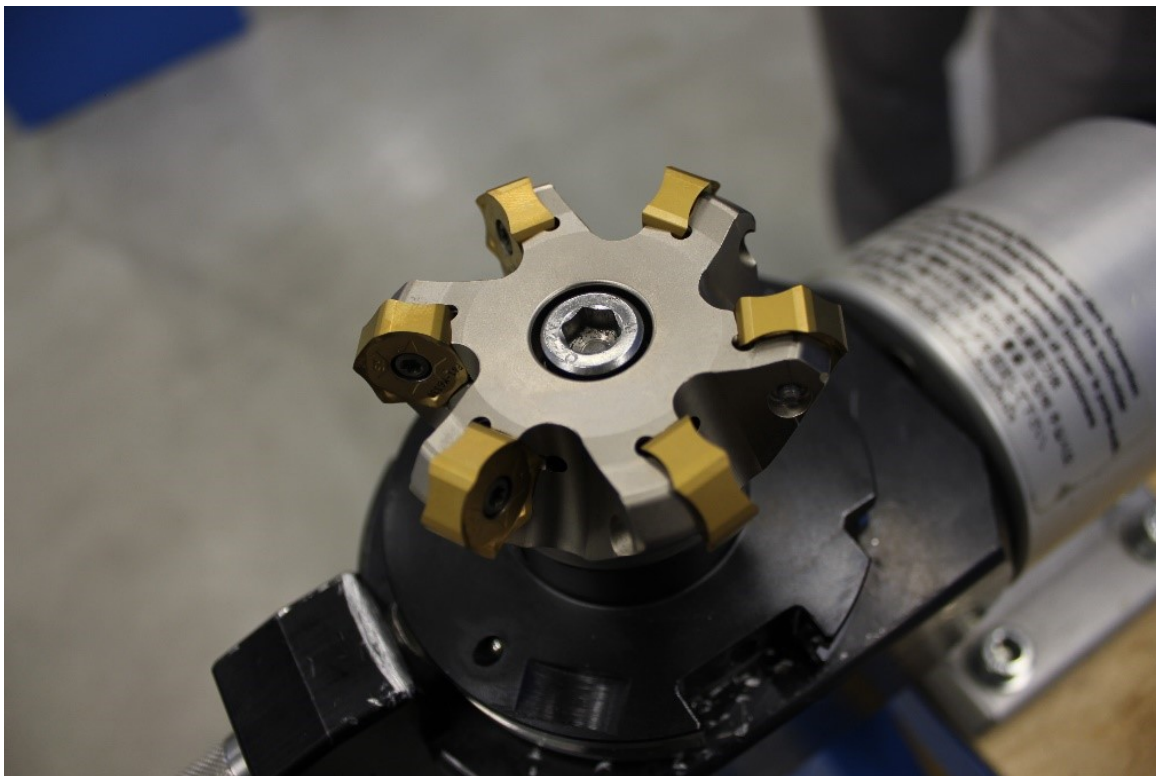
### 4.3 Funkční testy na utváření třísky + měření drsnosti

Testy probíhaly s plně osazenou frézou (obr. č. 26). S každou sadou VBD byly uskutečněny 4 průjezdy, při každém průjezdu byly použity rozdílné řezné podmínky (tab. č. 6), po každém průjezdu byly sesbírány vzorky třísek a taktéž měřena drsnost obrobeného povrchu.

Řezné podmínky byly zvoleny podle doporučení výrobce, které se vyskytuje na zadní straně krabičky se sadou VBD.

Tab. 6: Řezné podmínky jednotlivých průjezdů pro funkční testy

Průjezd	$a_p$ [mm]	$f$ [mm.min <sup>-1</sup> ]	$f_z$ [mm]	$a_e$ [mm]	$n$ [min <sup>-1</sup> ]	$l$ [mm]	$v_c$ [m.min <sup>-1</sup> ]
1	1	91	0,12	53	126	303	25
2	1	136	0,18	53	126	303	25
3	3	91	0,12	53	126	303	25
4	3	136	0,18	53	126	303	25



*Obr. 26: Fréza osazena VBD*

#### **4.3.1 Vyhodnocení utváření třísek**

Správně utvořená tříska zabraňuje porušení obrobku, mohlo by se tedy zdát, že nejvhodnější třísky jsou ty krátké. Avšak u moc krátké třísky nedochází k dostatečnému odvodu tepla, které se pak hromadí v nástroji a snižuje tak jeho životnost. Další nevýhodou je, že přespříliš krátké třísky mohou zapříčinit vznik mikrotrhlin na ostří, to následně směřuje k vylomení ostří. Z toho tedy plyne, že nejideálnější tříska je ve tvaru krátké spirály.

Nejlépe utvářely třísku VBD s označením HNGX 0906ANSN-SM-P01 ; M6330, avšak i ostatní destičky uspokojivě utvářely třísku. Dílčí tvary třísek lze vidět v třískovém diagramu, který je součástí přílohy B a přílohy C.

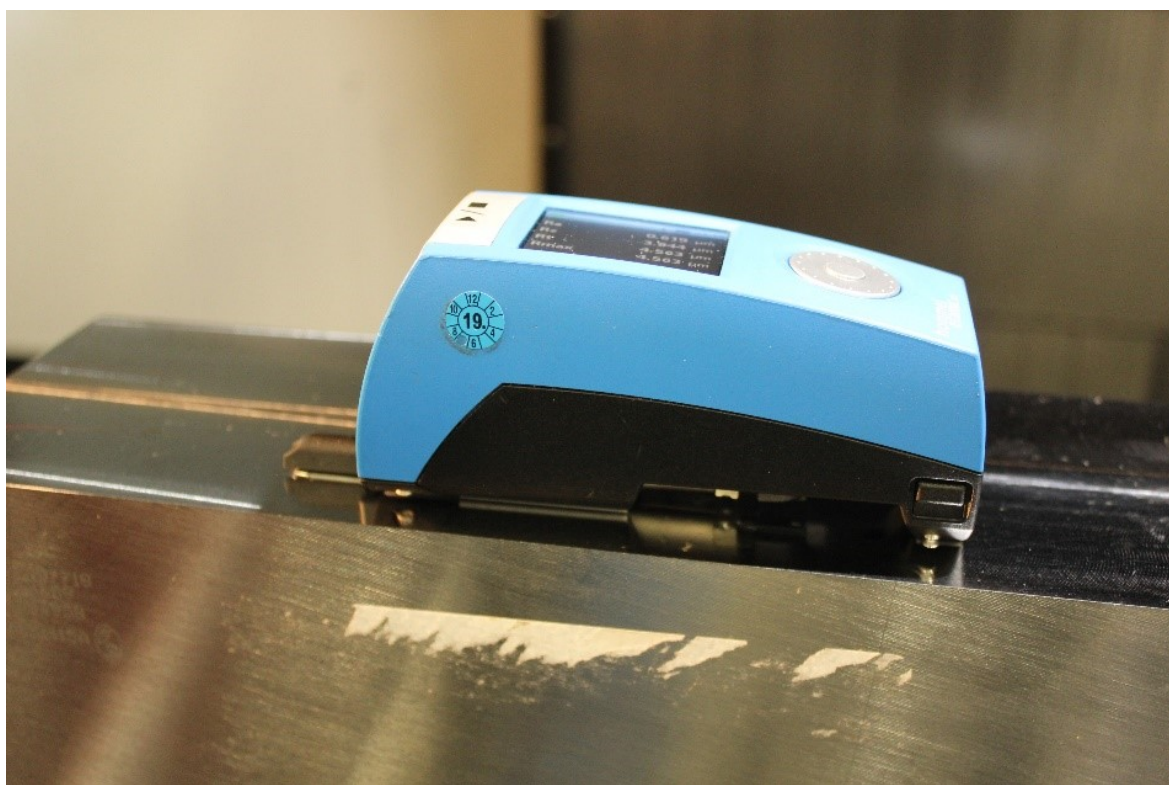


### 4.3.2 Drsnost povrchu po průjezdu jednotlivých typů VBD

Drsnost po jednotlivých průjezdech byla měřena drsnoměrem Hommel – Etamic W5 viz obrázek 27. Dílčí naměřené drsnosti jsou uvedeny v tabulce č. 7.



*Obr. 27: Drsnoměr s příslušenstvím*



*Obr. 28: Měření drsnosti*

### 4.3.3 Vyhodnocení drsnosti

Tab. 7: Naměřené drsnosti

Drsnost při $a_p = 1\text{ mm}$	$f_z = 0,12\text{ mm}$		$f_z = 0,18\text{ mm}$	
	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )
HNGX 0906ANSN-M;M6330	0,180	1,352	0,332	2,539
HNGX 0906ANSN-SM-P01;M6330	0,613	3,844	1,092	6,359
HNGX 0906ANSN-SM-P02;M6330	0,991	4,788	0,971	6,905
Drsnost při $a_p = 3\text{ mm}$				
HNGX 0906ANSN-M;M6330	0,204	1,858	1,080	9,157
HNGX 0906ANSN-SM-P01;M6330	0,849	5,474	2,335	12,728
HNGX 0906ANSN-SM-P02;M6330	1,185	5,668	1,811	7,719

Z naměřených drsností je zřejmé, že nejlepší jakosti povrchu docílily destičky s označením HNGX 0906ANSN-M; M6330.

#### 4.4 Trvanlivostní test

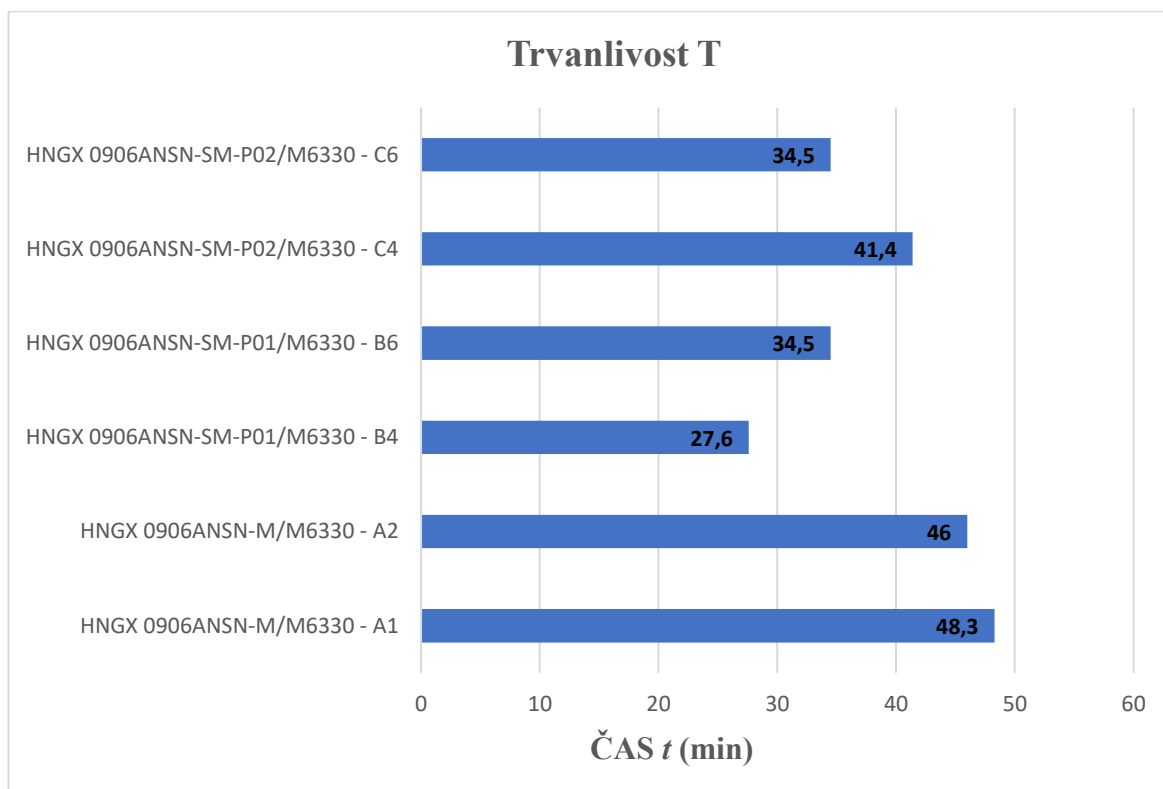
Trvanlivostní testy probíhaly s frézou osazenou pouze 1 destičkou, u každého typu VBD byly testovány 2 vzorky. Jednotlivé průjezdy byly realizovány na šířku slitiny, po každém průjezdu byl proces zastaven a bylo přeměřeno opotřebení hlavního břitu a opotřebení špičky hlavního břitu, taktéž bylo nafoceno opotřebení čela a hřbetu. Tímto způsobem se pokračovalo až do úplného opotřebení destičky, tedy do stavu, kdy se razantně změnila řezná geometrie a danou destičkou již nebylo možno dále obrábět. Všechny VBD byly testovány při stejných řezných podmínkách, samotné řezné podmínky pro trvanlivostní test jsou uvedeny v tabulce 8 společně s dalšími údaji o trvanlivostním testu. Cílem testu bylo zjistit trvanlivost jednotlivých typů VBD.

Tab. 8: Protokol o trvanlivostním testu

<b>Stroj</b>	Typ	MCV 1270
	Výkon	28 kW
<b>Nástroj</b>	Označení	63A06R-S45HN09
	Průměr	63 mm
	Počet destiček	1
<b>Obrobek</b>	Materiál	Inconel 718
	Tvrдость	350 HB
<b>Řezné podmínky</b>	Řezná rychlost	$v_c = 25 \text{ m/min}$
	Otáčky	$n = 126 \text{ ot/min}$
	Posuv na zub	$f_z = 0,12 \text{ mm}$
	Posuv	$f = 15 \text{ mm/min}$
	Hloubka záběru	$a_p = 3 \text{ mm}$
	Šířka frézované plochy	$a_e = 50 \text{ mm}$
	Délka 1 záběru	$l = 105 \text{ mm}$
	Chlazení	Stlačeným vzduchem
	Čas 1 záběru	$T_{z1} = 6,9 \text{ min}$

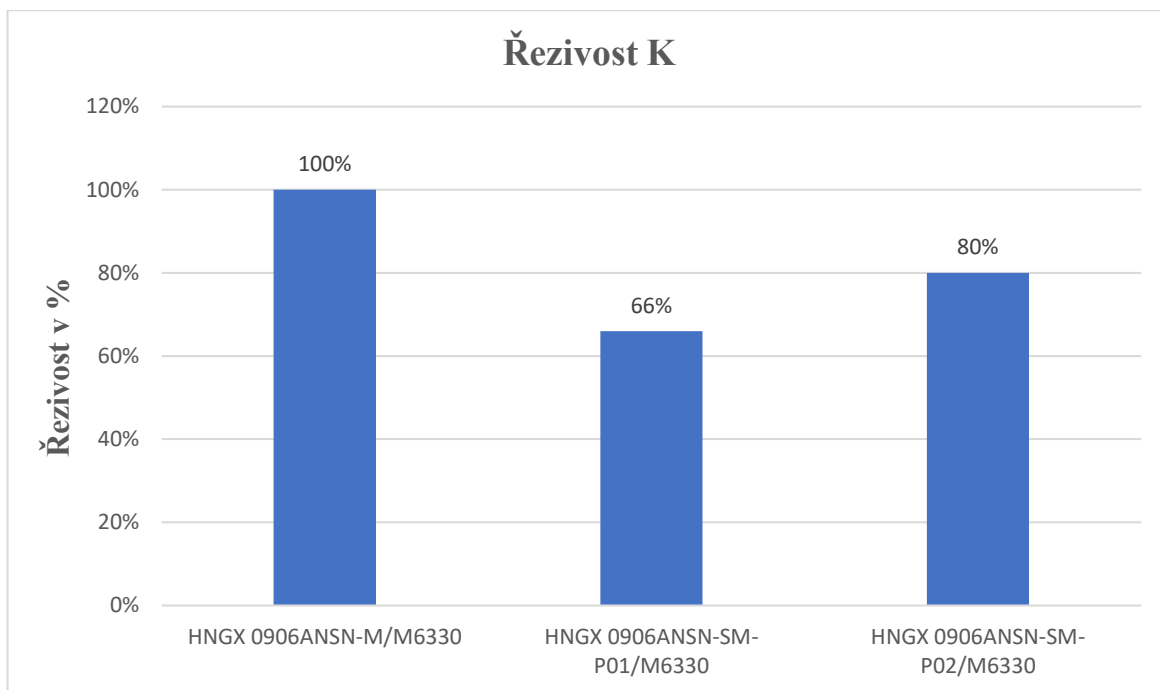
#### 4.4.1 Vyhodnocení trvanlivostního testu

Vyhodnocení trvanlivostního testu bylo přehledně zpracováno do 4 grafů: trvanlivost, řezivost, opotřebení hlavního břitu a opotřebení špičky hlavního břitu, ke grafům opotřebení byly zpracovány tabulky s fotkami jednotlivých opotřebení v čase.



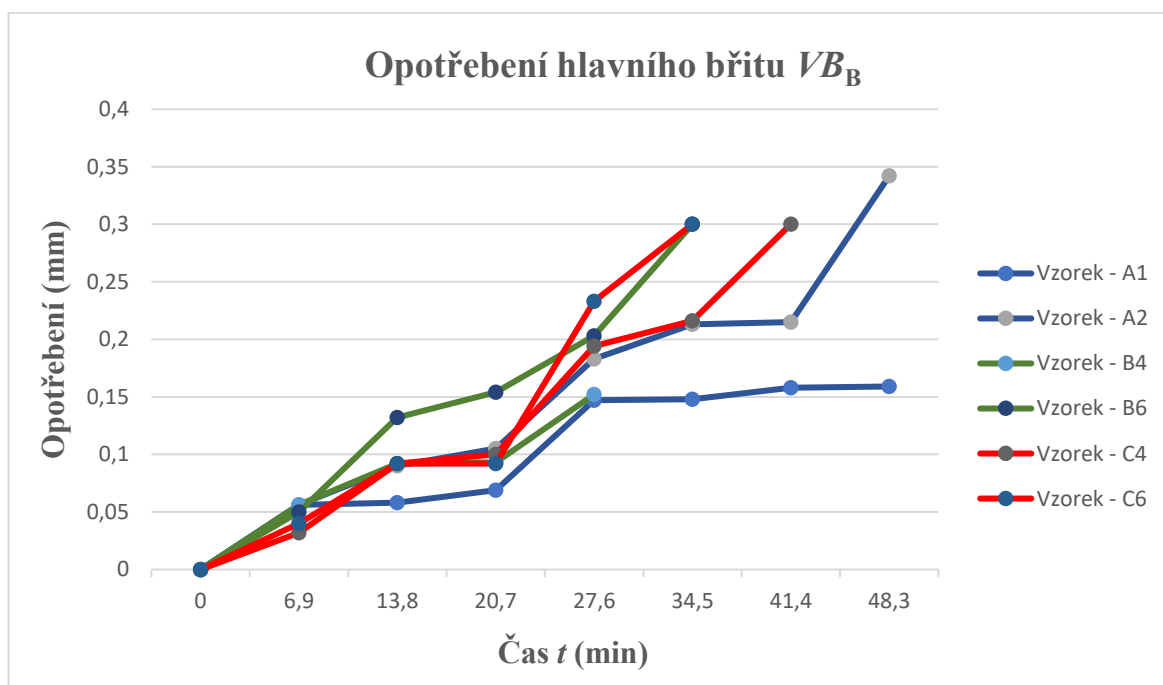
Graf 1: Trvanlivost

Graf vyobrazuje trvanlivost, tedy čas do úplného otupení destiček jednotlivých vzorků. Písmena A, B a C označují jednotlivé vzorky viz příloha A. Z grafu vyplývá, že nejlepších hodnot docílila geometrie M a to průměrně 47,2 minut, rozptyl vzorků dané geometrie činil pouze 2,4 %, hned za ní se umístila geometrie SM-P02 průměrná trvanlivost těchto vzorků je 38 minut a rozptyl 9,1 %, špatně si nevedla ani geometrie SM-P01, jejíž průměrná trvanlivost byla 31,1 minut s rozptylem 11,1 %. U všech testovaných vzorků došlo v průběhu řezné zkoušky k vytvoření malých výmolů na čele v blízkosti řezné hrany. Tyto výmoly se postupně prohloubily, až narušily řeznou hranu, která se poté v těchto místech vyštípla.



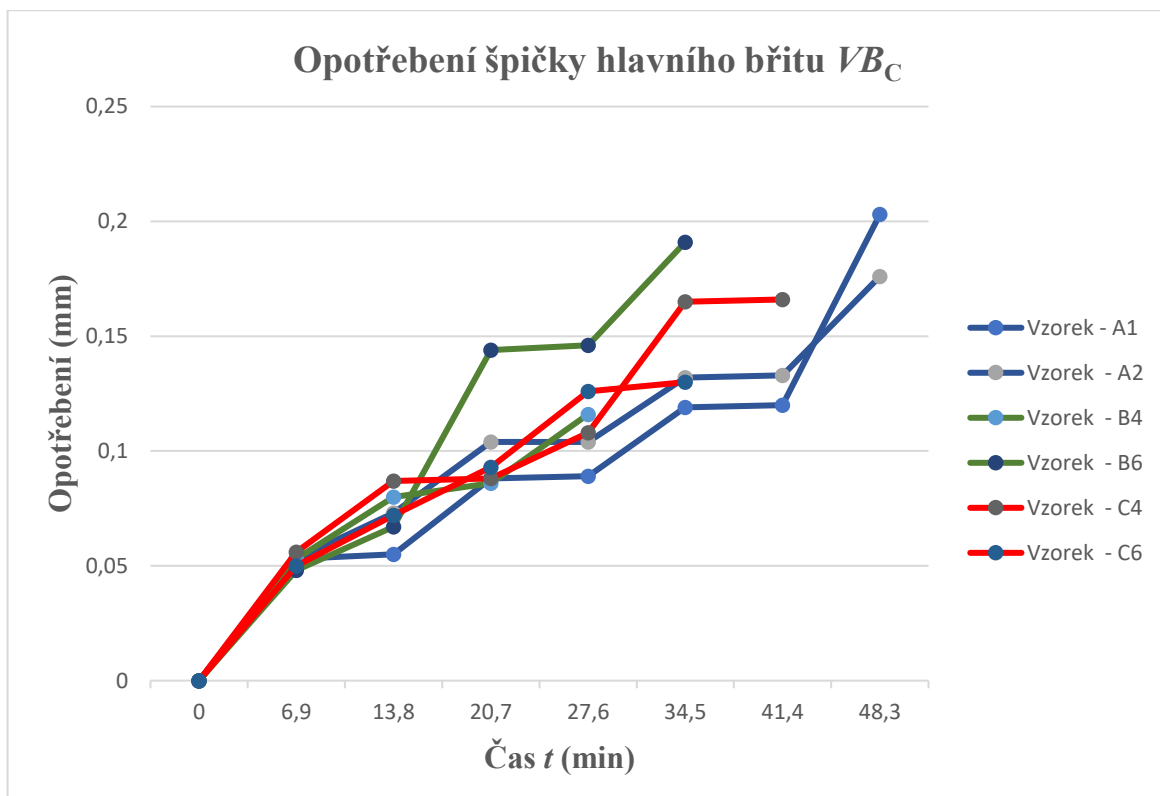
Graf 2: Řezivost

Graf vyobrazuje řezivost jednotlivých typů VBD, tedy poměr mezi etalonem a daným typem destiček, řezivost byla počítána z průměru trvanlivosti dvou testovaných vzorků každé geometrie. Jako etalon byla použita geometrie typu M.



Graf 3: Opotřebení hlavního břitu  $VB_B$





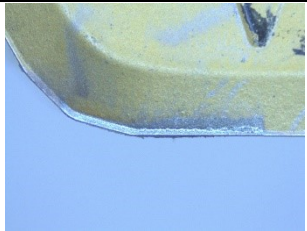

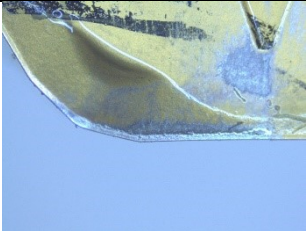
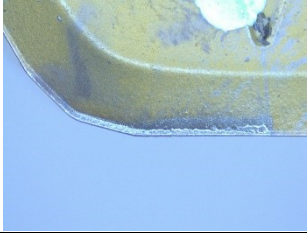
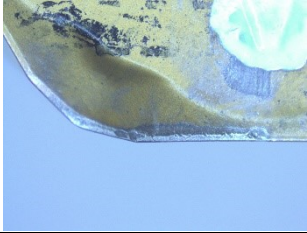
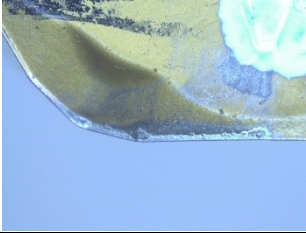

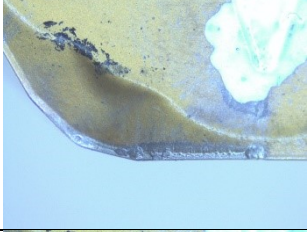









*Graf 4: Opotřebení špičky hlavního bříty  $VB_C$*

Grafy vyobrazují opotřebení jednotlivých vzorků na hlavním břítu a opotřebení špičky hlavního břítu, samotné hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 9. Jednotlivé průjezdy byly realizovány na šířku slitiny, to je 105 mm, po každém průjezdu byl stroj pozastaven a bylo změřeno opotřebení na hlavním břítu a špičce hlavního břítu, taktéž byly pořízeny fotky opotřebení čela a hřbetu viz tabulka č. 10 a tabulka č. 11. Nejlépe si vedla geometrie typu M, ale i ostatní geometrie předvedly uspokojivou odolnost proti opotřebení.



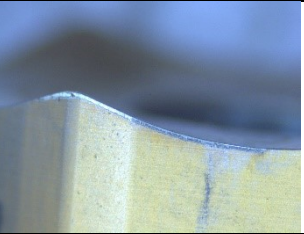


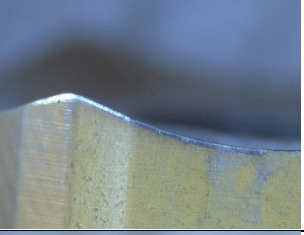



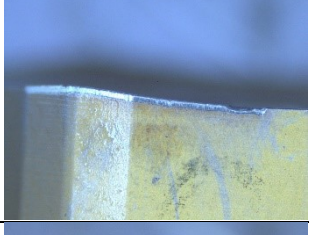
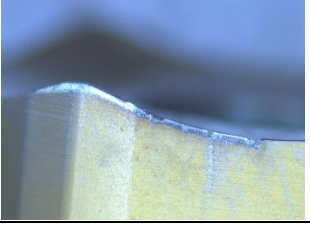
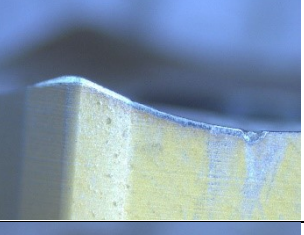

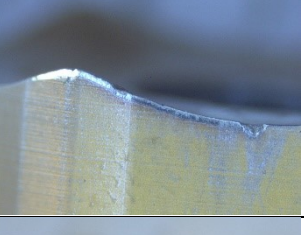

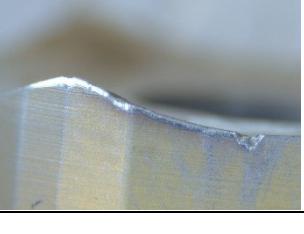
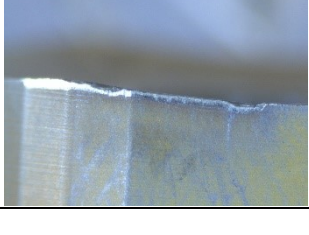
Tab. 9: Dílčí hodnoty opotřebení

Vzorek	Čas	min	6,9	13,8	20,7	27,6	34,5	41,4	48,3
<b>A11</b>	$VB_B$	mm	0,056	0,058	0,069	0,147	0,148	0,158	0,159
	$VB_C$	mm	0,053	0,055	0,088	0,089	0,119	0,120	0,203
<b>A20</b>	$VB_B$	mm	0,056	0,090	0,105	0,183	0,213	0,215	0,342
	$VB_C$	mm	0,053	0,073	0,104	0,104	0,132	0,133	0,176
<b>B14</b>	$VB_B$	mm	0,056	0,092	0,093	0,152			
	$VB_C$	mm	0,053	0,080	0,086	0,116			
<b>B16</b>	$VB_B$	mm	0,05	0,132	0,154	0,203	0,300		
	$VB_C$	mm	0,048	0,067	0,144	0,146	0,191		
<b>C14</b>	$VB_B$	mm	0,032	0,092	0,100	0,194	0,216	0,300	
	$VB_C$	mm	0,056	0,087	0,088	0,108	0,165	0,166	
<b>C16</b>	$VB_B$	mm	0,04	0,092	0,092	0,233	0,300		
	$VB_C$	mm	0,050	0,072	0,093	0,126	0,130		

Tab. 10: Průběh opotřebení VBD na čele.

Typ VBD	HNGX 0906ANSN-M;M6330	HNGX 0906ANSN-SM-P01;M6330	HNGX 0906ANSN-SM-P02;M6330
Vzorek	A11	B14	C14
6,9 min			
13,8 min			
20,7 min			
27,6 min			
34,5 min		-----	
41,4 min		-----	
48,3 min		-----	-----

Tab. 11: Průběh opotřebení VBD na hřbetu.

Typ VBD	HNGX 0906ANSN-M;M6330	HNGX 0906ANSN-SM-P01;M6330	HNGX 0906ANSN-SM-P02;M6330
Vzorek	A11	B14	C14
6,9 min			
13,8 min			
20,7 min			
27,6 min			
34,5 min		-----	
41,4 min		-----	
48,3 min		-----	-----

## 5 Závěr

Bakalářská práce vznikla za spoluúčasti firmy Dormer Pramet. Tématem práce byl návrh geometrie vyměnitelných břitových destiček typu HNGX 09 pro rovinné frézování superslitin a porovnání staré geometrie s geometrií nově navrženou a ověření obou řešení praktickým testem. Praktické testy byly uskutečněny v experimentálním centru firmy Dormer Pramet za účasti kvalifikovaných pracovníků.

Praktické testy obrábění se skládaly ze dvou částí. První testy byly zaměřeny na utváření třísky v místě řezu a jakost obrobeného povrchu. Nejlépe utvářely třísku destičky typu HNGX 0906ANSN-SM-P01;M6330, avšak i u ostatních destiček docházelo k uspokojivému utváření třísky. Nejlepších jakostí obrobeného povrchu ( $R_a$ ,  $R_z$ ) bylo dosaženo při použití destiček HNGX 0906ANSN-M;M6330. Druhé praktické testy byly zaměřeny na trvanlivost jednotlivých VBD za stejných řezných podmínek. Nejlépe si opět vedla VBD HNGX 0906ANSN-M;M6330. Výsledky jednotlivých testů byly zpracovány do tabulek, z kterých byly vytvořeny grafy pro porovnání jednotlivých typů destiček.

Za zmínku stojí, že geometrie typu M podle katalogu firmy Dormer Pramet je vhodná pouze pro obrábění materiálů skupin ISO P a ISO M, avšak obstála i při obrábění materiálu ISO S, konkrétně Inconelu 718.

Z výše uvedených dílčích závěrů navrhuji pro další postup vývoje geometrie pro obrábění superslitin na destičkách HNGX 09 řešit následující parametry VBD:

- a) velikost přechodového břitu (mezi vedlejším a hlavním břitem),
- b) výšku vedlejšího (hladícího) břitu,
- c) výšku vytažení špičky VBD,
- d) sklon hlavního břitu VBD,
- e) velikost fazetky,
- f) velikost zaoblení řezné hrany.

Závěrem doporučuji provést funkční a trvanlivostní testy jednotlivých VBD při vyšších posuvech  $f$  ( $f_z$ ) a při použití procesní kapaliny.

## **Poděkování**

Toto poděkování bych rád věnoval panu doc. Ing. Vladimíru Vrbovi, CSc. a panu Ing. Martinu Binderovi, Ph.D. za jejich cenné rady a připomínky při psaní této práce. Dále bych chtěl poděkovat pracovníkům Dormer Pramet, s.r.o. za jejich pomoc při praktických zkouškách. V neposlední řadě chci poděkovat rodičům za podporu a trpělivost během studia.

## 6 Použitá literatura

- [1] BUKHARI, U. *Super alloys part 1. Materials and metalurgy*. [online], 2013 [cit. 2019-01-13]. Dostupné z: <http://iambzu.blogspot.cz/2013/03/super-alloys-part-1.html>
- [2] DURAND-CHARRE, M. *The Microstructure of Superalloys*. Gordon & Breach Science Publisher, Amsterdam, 1997. 121 s. ISBN-10 9056990977.
- [3] PERIODICALS OF ENGINEERING AND NATURAL SCIENCE (PEN) *A Review on superalloys and IN718 Nickel-Based-Inconel-Superalloy* [online], 2013 [cit. 2019-01-13]  
Dostupné z: <http://pen.ius.edu.ba/index.php/pen/article/view/43/47>
- [4] HORNÍK, J. *Vysokopevné a vysokolegované oceli a slitiny* [online], 2014 [cit. 2019-02-05].  
Dostupné z: [http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/10/01\\_pm\\_vyskopevne\\_a\\_vysokolegovane\\_oceli\\_a\\_slitiny\\_ni\\_a\\_co.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/10/01_pm_vyskopevne_a_vysokolegovane_oceli_a_slitiny_ni_a_co.pdf)
- [5] GEDDES, B, Hugo L a Xiao H. *Superalloys alloying and performance*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2010. ISBN 1615031421.
- [6] KOVOSVIT MAS *Obráběcí stroje, CNC stroje, CNC soustruhy* [online], [cit. 2019-02-06]  
Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/mcv-1270-p9.html#technicaldata>
- [7] DARECKÝ, J. *Superzliatiny niklu a ich obrábanie*. Ľilina: Ľilinská univerzita / Monografie, 2001. 107 s. ISBN 80-7100-785-4.
- [8] PTÁČEK, L. a kolektiv. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 396 s. ISBN: 80-7204-248-3
- [9] *Letecký petrolej* [online], 2018 [cit. 2019-02-06].  
Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/letecky-petrolej/>
- [10] DONACHIE, M. J. DONACHIE, S. J. *Superalloys – A Technical Guide*, second edition. ASM International, 2002, ISBN 0-087170-749-7.
- [11] PARR INSTRUMENT COMPANY *High-Performance Alloys for Resistance to Aqueous Corrosion* [online], 2011 [cit. 2019-02-08].  
Dostupné z: [http://www.parrinst.com/wp-content/uploads/downloads/2011/07/Parr\\_Inconel-Incoloy-Monel-Nickel-Corrosion-Info.pdf](http://www.parrinst.com/wp-content/uploads/downloads/2011/07/Parr_Inconel-Incoloy-Monel-Nickel-Corrosion-Info.pdf)
- [12] BRYCHTA, J., ČEP, R., NOVÁKOVÁ, J, PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava: Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [13] *Monel – Wikipedie*. [online], [cit. 2019-02-08].  
Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Monel>
- [14] NESLUŠAN, M.: CZÁN, A. *Obrábanie titánových a niklových zliatin*. Žilina : Žilinská univerzita v Žilině / EDIS. 2001. 189 s. ISBN 80-7100-933-4.



- [15] BIBUS METALS s.r.o. [online], 2019 [cit. 2019-03-27].  
Dostupné z: <https://www.bibusmetals.cz/materialy/nikl-niklove-slitiny/incoloyr-alloys/incoloyr-alloy-825/>
- [16] DE VOS, P.: *Příručka pro technology - Obrobitelnost*. MM Průmyslové spektrum, 2011 / 12, str. 58. Kód článku: 111218.
- [17] MRKVICA, M.: *Obrábění nástroji s geometricky definovaným břitem*, 1. díl, Ostrava VŠB – Technická univerzita Ostrava. 1993. 197 s., ISBN 80-7078-213-7.
- [18] GRYČ, J. *Obrábění titanu, superslitin a nerezavějících ocelí*. [online], Česká republika 2013 [cit. 2019-03-28].  
Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-titanu-superslitin-a-nerezavejicich-oceli.html>
- [19] ZLÁMAL, T. *Příspěvek k obrábění Ni superslitin a hodnocení řezivosti vybraných řezných materiálů*. Ostrava, 2015. Disertační práce. VŠB-Technická univerzita Ostrava.
- [20] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje* [online]. Brno, 2006 [cit. 2019-03-29].  
Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat\\_pro\\_rez\\_nastroje/materialy\\_pro\\_rezne\\_nastroje\\_v2.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/mat_pro_rez_nastroje/materialy_pro_rezne_nastroje_v2.pdf)
- [21] KŘÍŽ, A. *Prášková metalurgie*, [online], [cit. 2019-03-29].  
Dostupné z: [ateam.zcu.cz/praskova\\_metalurgie.pdf](http://ateam.zcu.cz/praskova_metalurgie.pdf)
- [22] ČEP, R. *Obrobitelnost materiálů*. [online]. [cit. 2019-03-19]. Ostrava-Poruba: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, Fakulta strojní,  
Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO\\_kapitola\\_06.pdf](http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/EMO_kapitola_06.pdf)
- [23] ČEP, R. a PETRŮ, J. *Experimentální metody v obrábění*. Ostrava-Poruba: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, Fakulta strojní, 2011. ISBN 978-80-248-2533-5.
- [24] *Inconel – Enpedie*. [online], [cit. 2019-02-08].  
Dostupné z: <http://www.enpedie.cz/wiki/Inconel>



## 7 Seznam příloh

Příloha A      Tabulka velikostí fazetek a zaoblení řezných hran

Příloha B      Třískový diagram při  $a_p = 1 \text{ mm}$

Příloha C      Třískový diagram při  $a_p = 3 \text{ mm}$





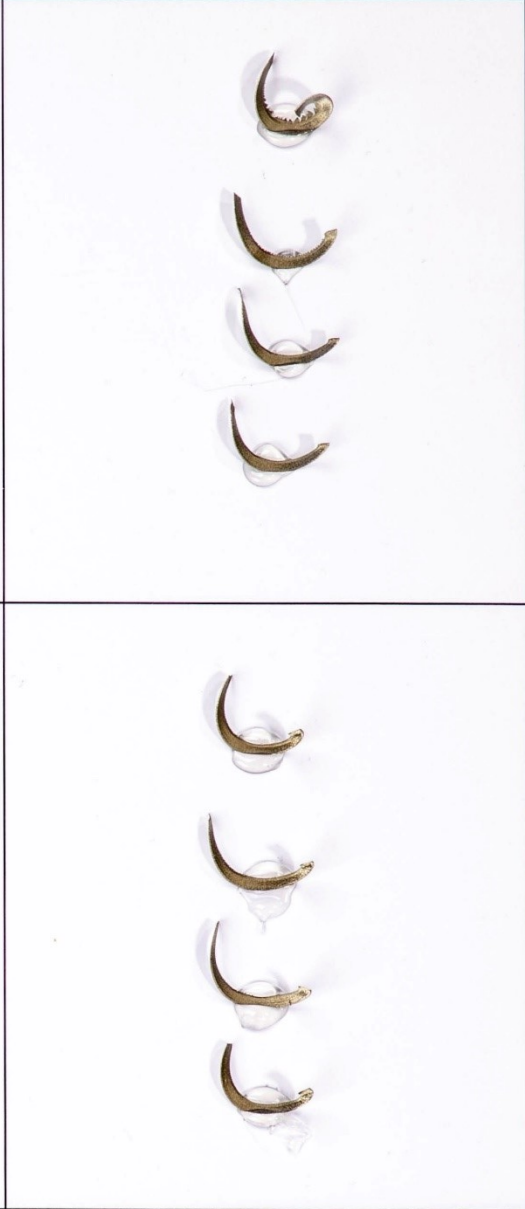



HNGX 0906ANSN-M;M6330	VBD č.1		VBD č.2		VBD č.3		VBD č.4		VBD č.5		VBD č.6		VBD č.7		VBD č.8		VBD č.9		VBD č.10	
Vzorky A	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky
Řezná hrana č.1	34/1	0,086	39/1	0,105	38/1	0,093	38/0	0,105	34/0	0,117	39/1	0,102	38/0	0,118	40/1	0,113	37/0	0,097	38/1	0,119
Řezná hrana č.2	23/0	0,089	36/1	0,093	29/1	0,01	40/0	0,103	31/0	0,113	35/2	0,096	41/0	0,090	43/0	0,098	33/0	0,112	40/0	0,100
Řezná hrana č.3	27/1	0,095	29/0	0,115	28/1	0,095	40/0	0,105	37/0	0,121	33/1	0,112	34/0	0,097	33/0	0,096	41/0	0,110	35/2	0,090
Řezná hrana č.4	25/1	0,095	31/1	0,085	32/2	0,102	42/0	0,093	29/0	0,103	41/0	0,103	32/0	0,098	34/2	0,092	45/0	0,114	34/0	0,104
Řezná hrana č.5	30/1	0,08	37/1	0,1	36/0	0,09	39/1	0,09	33/0	0,098	35/1	0,102	35/0	0,093	41/0	0,093	34/0	0,085	32/1	0,110
Řezná hrana č.6	34/0	0,085	38/0	0,096	38/1	0,01	36/1	0,096	36/0	0,105	38/2	0,100	48/0	0,085	41/1	0,102	41/0	0,090	34/1	0,102
HNGX 0906ANSN-M;M6330	VBD č.11		VBD č.12		VBD č.13		VBD č.14		VBD č.15		VBD č.16		VBD č.17		VBD č.18		VBD č.19		VBD č.20	
Vzorky A	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany		Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky
Řezná hrana č.1	34/1	0,111	30/0	0,098	46/0	0,090	38/0	0,095	49/1	0,103	28/0	0,095	38/2	0,099	40/0	0,111	42/0	0,097	35/1	0,103
Řezná hrana č.2	35/0	0,104	39/0	0,090	38/0	0,093	33/1	0,097	50/0	0,082	31/0	0,101	38/1	0,095	37/1	0,100	43/1	0,086	30/1	0,106
Řezná hrana č.3	40/0	0,107	34/0	0,098	39/0	0,088	27/0	0,100	56/0	0,085	23/0	0,096	35/1	0,096	37/0	0,103	45/1	0,101	35/1	0,101
Řezná hrana č.4	42/0	0,098	38/0	0,098	38/0	0,080	36/1	0,106	53/0	0,095	28/1	0,109	35/1	0,101	38/0	0,097	49/0	0,103	43/0	0,108
Řezná hrana č.5	30/0	0,106	42/1	0,103	40/0	0,109	37/1	0,090	49/0	0,080	30/0	0,101	38/1	0,112	31/1	0,098	40/0	0,108	46/0	0,098
Řezná hrana č.6	40/0	0,093	32/0	0,090	40/0	0,100	39/0	0,095	50/1	0,080	26/0	0,104	40/1	0,101	33/0	0,101	46/0	0,116	37/0	0,110

HNGX0906ANSN-SM-P01;M6330	VBD č.1		VBD č.2		VBD č.3		VBD č.4		VBD č.5		VBD č.6		VBD č.7		VBD č.8		VBD č.9		VBD č.10	
Vzorky B	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky
Řezná hrana č.1	39/0	0,126	36/1	0,139	39/1	0,142	27/0	0,138	33/0	0,103	36/0	0,121	32/2	0,128	37/0	0,127	31/0	0,120	35/0	0,130
Řezná hrana č.2	34/1	0,133	35/0	0,132	33/0	0,125	40/0	0,114	29/0	0,110	34/1	0,100	35/1	0,101	34/0	0,107	32/1	0,117	37/0	0,123
Řezná hrana č.3	35/0	0,122	39/0	0,106	34/0	0,111	37/1	0,101	34/0	0,107	36/1	0,096	35/1	0,095	35/0	0,099	27/0	0,105	37/1	0,097
Řezná hrana č.4	38/1	0,110	34/0	0,118	37/0	0,107	36/0	0,097	36/1	0,098	37/0	0,091	35/2	0,103	39/0	0,093	39/1	0,101	36/0	0,104
Řezná hrana č.5	48/0	0,117	32/0	0,131	35/0	0,105	33/0	0,115	35/0	0,100	32/1	0,111	35/1	0,108	30/0	0,104	46/0	0,102	32/0	0,096
Řezná hrana č.6	36/1	0,122	33/0	0,125	31/0	0,135	31/1	0,141	35/0	0,130	34/1	0,114	29/1	0,126	32/1	0,101	39/0	0,110	34/1	0,129
HNGX0906ANSN-SM-P01;M6330	VBD č.11		VBD č.12		VBD č.13		VBD č.14		VBD č.15		VBD č.16		VBD č.17		VBD č.18		VBD č.19		VBD č.20	
Vzorky B	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky
Řezná hrana č.1	43/1	0,122	35/1	0,123	38/1	0,107	39/0	0,117	36/2	0,130	32/1	0,110	33/1	0,113	40/0	0,121	37/0	0,129	37/0	0,122
Řezná hrana č.2	35/2	0,101	39/1	0,097	35/1	0,130	39/0	0,105	33/1	0,107	35/0	0,107	30/0	0,093	31/0	0,095	36/1	0,094	36/1	0,125
Řezná hrana č.3	36/1	0,116	38/1	0,094	35/2	0,100	40/0	0,093	38/1	0,100	35/0	0,092	35/0	0,087	31/0	0,107	29/0	0,098	27/0	0,103
Řezná hrana č.4	31/0	0,100	36/0	0,093	32/2	0,093	41/1	0,096	35/2	0,093	33/0	0,095	36/0	0,090	29/0	0,098	37/1	0,120	35/0	0,115
Řezná hrana č.5	37/0	0,097	36/1	0,110	34/1	0,101	35/1	0,107	36/1	0,105	37/1	0,090	38/1	0,098	32/0	0,102	37/1	0,107	34/1	0,126
Řezná hrana č.6	40/1	0,104	33/0	0,115	36/2	0,113	33/0	0,094	37/1	0,116	37/0	0,123	38/1	0,115	38/0	0,122	37/0	0,115	35/0	0,107

HNGX0906ANSN-SM-P02;M6330	VBD č.1		VBD č.2		VBD č.3		VBD č.4		VBD č.5		VBD č.6		VBD č.7		VBD č.8		VBD č.9		VBD č.10	
Vzorky C	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky
Řezná hrana č.1	33/1	0,113	33/1	0,115	32/1	0,109	35/1	0,105	31/1	0,105	35/1	0,106	38/0	0,098	33/1	0,120	33/0	0,114	37/0	0,117
Řezná hrana č.2	35/1	0,108	36/1	0,116	37/1	0,102	30/0	0,100	28/1	0,115	39/1	0,114	31/2	0,115	35/0	0,122	33/0	0,114	38/0	0,101
Řezná hrana č.3	36/0	0,109	37/1	0,100	40/1	0,103	33/0	0,095	27/1	0,106	42/1	0,114	29/1	0,105	32/0	0,119	36/1	0,102	31/0	0,107
Řezná hrana č.4	34/1	0,107	40/0	0,107	35/0	0,095	34/0	0,106	34/1	0,115	36/0	0,111	31/1	0,115	35/0	0,103	33/1	0,103	34/1	0,108
Řezná hrana č.5	35/0	0,110	36/1	0,090	33/1	0,085	30/0	0,100	30/1	0,090	33/1	0,100	36/1	0,092	34/0	0,098	37/1	0,100	34/0	0,091
Řezná hrana č.6	34/1	0,095	30/1	0,098	31/1	0,088	35/0	0,103	27/1	0,100	32/2	0,096	37/0	0,100	35/0	0,105	37/0	0,105	30/1	0,097
HNGX0906ANSN-SM-P02;M6330	VBD č.11		VBD č.12		VBD č.13		VBD č.14		VBD č.15		VBD č.16		VBD č.17		VBD č.18		VBD č.19		VBD č.20	
Vzorky C	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky	Velikost zaoblení řezné hrany	Šířka fazetky
Řezná hrana č.1	41/0	0,116	32/1	0,090	32/0	0,116	34/0	0,107	38/0	0,110	28/1	0,090	36/0	0,117	34/1	0,105	29/1	0,115	37/0	0,102
Řezná hrana č.2	33/0	0,115	42/0	0,112	34/0	0,113	36/0	0,117	32/1	0,110	29/1	0,100	40/1	0,100	31/0	0,100	32/1	0,112	35/0	0,118
Řezná hrana č.3	30/0	0,110	36/0	0,100	35/1	0,120	35/0	0,108	26/1	0,100	35/0	0,093	41/0	0,115	35/0	0,115	35/0	0,129	30/0	0,098
Řezná hrana č.4	32/0	0,088	35/0	0,098	31/1	0,113	34/0	0,099	30/1	0,105	35/0	0,104	37/0	0,110	31/1	0,105	33/0	0,113	27/0	0,096
Řezná hrana č.5	30/0	0,089	31/0	0,090	31/0	0,097	29/0	0,096	33/0	0,101	35/0	0,100	34/0	0,090	32/0	0,099	32/1	0,100	28/1	0,092
Řezná hrana č.6	31/0	0,102	33/0	0,095	34/1	0,100	34/0	0,098	34/0	0,100	29/0	0,097	36/0	0,093	35/0	0,122	30/2	0,116	34/1	0,105




Příloha A: Tabulka velikostí fazetek a zaoblení řezných hran.



Axiální hloubka řezu:	Označení materiálu:		Inconel 718
$a_p = 1,0 \text{ mm}$	Tvrdost materiálu:		350 HB
	Označení frézy:		63A06R-S45HN09C
	Radiální hloubka řezu:		$a_e = 53 \text{ mm}$
	Řezná rychlost:		$v_c = 25 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
	Otáčky:		$n = 126 \text{ min}^{-1}$
Posuv $f_z$ [mm]	0,12		0,18
Posuv $f$ [mm . min <sup>-1</sup> ]	91		136
HNGX 0906ANSN-SM-P01; M6330			
HNGX 0906ANSN-SM-P02; M6330			
HNGX 0906ANSN-M; M6330			
HNGX 0906ANSN-F; M6330			

Příloha B: Trískový diagram při  $a_p = 1 \text{ mm}$ .



Axiální hloubka řezu:	Označení materiálu:	Inconel 718
$a_p = 3,0 \text{ mm}$	Tvrdost materiálu:	350 HB
	Označení frézy:	63A06R-S45HN09C
	Radiální hloubka řezu:	$a_e = 53 \text{ mm}$
	Řezná rychlost:	$v_c = 25 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
	Otáčky:	$n = 126 \text{ min}^{-1}$
Posuv $f_z$ [mm]	0,12	0,18
Posuv $f$ [mm · min <sup>-1</sup> ]	91	136
HNGX 0906ANSN-SM-P01; M6330		
HNGX 0906ANSN-SM-P02; M6330		
HNGX 0906ANSN-M; M6330		
HNGX 0906ANSN-F; M6330		

Příloha C: Třískový diagram při  $a_p = 3 \text{ mm}$ .